第７回評価ワーキンググループ
資料３

次世代電力供給システム分野に係る技術に関する施策・事業評価報告書（案）

平成２６年２月

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ

はじめに

研究開発の評価は、研究開発活動の効率化・活性化、優れた成果の獲得や社会・経済への還元等を図るとともに、国民に対して説明責任を果たすために、極めて重要な活動であり、このため、経済産業省では、「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成２４年１２月６日、内閣総理大臣決定）等に沿った適切な評価を実施すべく「経済産業省技術評価指針」（平成２１年３月３１日改正）を定め、これに基づいて研究開発の評価を実施している。

また、第２５回産業構造審議会評価小委員会（平成２１年１月）において、新たな評価類型として「技術に関する施策評価」が審議・了承された。技術に関する施策評価は、当該技術分野全体の方向性等を勘案しつつ、当該施策の下に位置付けられる技術に関する事業のまとまりを俯瞰する形で、各事業の相互関係等に着目し、個々の事業に係る評価結果を踏まえて行うこととしている。

経済産業省において実施している技術に関する施策「次世代電力供給システム」は、将来に向けた世界的な気候変動問題の制約下における環境負荷を低減させることを目的とした電力の安定供給に係る技術開発を行うため、以下の技術に関する事業から構成される施策である。

A. 高効率ガスタービン実用化技術開発事業
  A1. 1700℃級ガスタービン実用化技術開発事業
    【実施期間：平成20年度～平成23年度　事後評価】
  A2. 高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発事業
    【実施期間：平成20年度～平成23年度　事後評価】
B. 高効率ガスタービン技術実証事業
  B1. 1700℃級ガスタービン技術実証事業
    【実施期間：平成24年度～平成32年度　中間評価】
  B2. 高湿分空気利用ガスタービン技術実証事業
    【実施期間：平成24年度～平成32年度　中間評価】
C. 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発事業
    【実施期間：平成20年度～平成28年度　中間評価】
D. 次世代型双方向通信出力制御実証事業【実施期間：平成23年度～平成25年度　中間評価】
E. 太陽光発電出力予測技術開発実証事業【実施期間：平成23年度～平成25年度　中間評価】
F. イットリウム系超電導電力機器技術開発事業
    【実施期間：平成20年度～平成24年度　事後評価（※事業評価はNEDO実施のため施策に係る評価のみ】

今回の評価は、技術に関する施策「次世代電力供給システム」、及びこの構成要素である技術に関する事業評価であり、実際の評価に際しては、省外の有識者からなる「次世代電力供給システム分野」に係る技術に関する施策・事業評価検討会（座長：大山　力　横浜国立大学大学院工学研究院教授）を開催した。

今般、当該検討会における検討結果が評価報告書の原案として産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ（座長：渡部　俊也　東京大学政策ビジョン研究センター教授）に付議され、内容を審議し、了承された。

本書は、これらの評価結果を取りまとめたものである。

平成２６年２月

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ

産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ

委　員　名　簿

座長	渡部　俊也	東京大学政策ビジョン研究センター教授
	大島　まり	東京大学大学院情報学環教授 東京大学生産技術研究所教授
	太田　健一郎	横浜国立大学工学研究院グリーン水素研究センター長 ・特任教授
	菊池　純一	青山学院大学法学部長・大学院法学研究科長
	小林　直人	早稲田大学研究戦略センター教授
	鈴木　　潤	政策研究大学院大学教授
	津川　若子	東京農工大学大学院工学研究院准教授
	森　　俊介	東京理科大学理工学研究科長 東京理科大学理工学部経営工学科教授
	吉本　陽子	三菱ＵＦＪリサーチ＆コンサルティング株式会社 経済・社会政策部主席研究員

（委員長除き、五十音順）

事務局：経済産業省産業技術環境局技術評価室

「次世代電力供給システム」に係る技術に関する施策・事業評価検討会
委員名簿

座　長	大山　力	横浜国立大学 大学院 工学研究院　教授
委　員	安芸　裕久	(独)産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 エネルギーネットワークグループリーダー
委　員	伊藤　敏憲	株式会社伊藤リサーチ・アンド・アドバイザリー 代表取締役
委　員	太田　有	早稲田大学 基幹理工学部 機械科学・航空学科 教授
委　員	佐藤　幹夫	電力中央研究所 研究アドバイザー
委　員	嶋田　隆一	東京工業大学 名誉教授
委　員	藤井　俊英	電気事業連合会 技術開発部長

（敬称略、五十音順）

事務局：経済産業省資源エネルギー庁電力基盤整備課

「次世代電力供給システム分野」に係る技術に関する施策・事業評価に係る省内関係者

１．技術に関する施策

【中間評価時】
（平成２５年度）
資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給・流通政策室長　井上　悟志（事業担当室長）
産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　飯村　亜紀子

【中間評価時】
（平成２２年度）
資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給･流通政策室長　吉川　徹志　（事業担当室長）
産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　　秦　茂則

２．技術に関する事業

A.　高効率ガスタービン実用化技術開発事業
A1. 1700℃級ガスタービン実用化技術開発事業
【事後評価時】
（平成２５年度）
資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給・流通政策室長　井上　悟志（事業担当室長）
産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　飯村　亜紀子

【中間評価時】
（平成２２年度）
資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給･流通政策室長　吉川　徹志　（事業担当室長）
産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　　秦　茂則

A2. 高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発事業
【事後評価時】
（平成２５年度）
資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給・流通政策室長　井上　悟志（事業担当室長）
産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　飯村　亜紀子

【中間評価時】
（平成２２年度）
資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給･流通政策室長　吉川　徹志　（事業担当室長）
産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　　秦　茂則

B. 高効率ガスタービン技術実証事業

B1. 1700℃級ガスタービン技術実証事業

【中間評価時】

（平成２５年度）

資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給・流通政策室長　井上　悟志（事業担当室長）

産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　飯村　亜紀子

B2. 高湿分空気利用ガスタービン技術実証事業

【中間評価時】

（平成２５年度）

資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給・流通政策室長　井上　悟志（事業担当室長）

産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　飯村　亜紀子

C. 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発事業

【中間評価時】

（平成２５年度）

資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給・流通政策室長　井上　悟志（事業担当室長）

産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　飯村　亜紀子

【中間評価時】

（平成２２年度）

資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給･流通政策室長　吉川　徹志　（事業担当室長）

産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　　秦　茂則

D. 次世代型双方向通信出力制御実証事業

【中間評価時】

（平成２５年度）

資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給・流通政策室長　井上　悟志（事業担当室長）

産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　飯村　亜紀子

【事前評価時】

（平成２２年度）

資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給･流通政策室長　吉川　徹志　（事業担当室長）

産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　　秦　茂則

E. 太陽光発電出力予測技術開発実証事業

【中間評価時】

（平成２５年度）

資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給・流通政策室長　井上　悟志（事業担当室長）

産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　飯村　亜紀子

【事前評価時】

（平成２２年度）

資源エネルギー庁　電力基盤整備課電力需給・流通政策室長　吉川　徹志　（事業担当室長）

産業技術環境局　産業技術政策課　技術評価室長　　秦　茂則

「次世代電力供給システム分野」に係る技術に関する施策・事業評価

審 議 経 過

○第１回評価検討会（平成２５年１１月１３日）
- ・評価の方法等について
- ・技術に関する施策・事業の概要について
- ・評価の進め方について

○第２回評価検討会（平成２５年１２月１９日）
- ・評価報告書(案)について

○産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発・評価小委員会評価ワーキンググループ
（平成２６年２月２７日）
- ・評価報告書(案)について

目　　次

はじめに
産業構造審議会産業技術環境分科会研究開発･評価小委員会評価ワーキンググループ　委員名簿
「次世代電力供給システム分野」に係る技術に関する施策・事業評価検討会　委員名簿
「次世代電力供給システム分野」に係る技術に関する施策・事業評価に係る省内関係者
「次世代電力供給システム分野」に係る技術に関する施策・事業評価　審議経過

ページ

技術に関する施策・事業評価報告書概要 …… i

第１章　評価の実施方法
１．評価目的 …… 2
２．評価者 …… 3
３．評価対象 …… 3
４．評価方法 …… 4
５．プロジェクト評価における標準的な評価項目・評価基準 …… 4

第２章　技術に関する施策の概要
１．施策の目的・政策的位置付け …… 8
２．施策の構造及び目的実現の見通し …… 13

第３章　技術に関する事業の概要
Ａ．高効率ガスタービン実用化技術開発事業
A1.　1700℃級ガスタービン実用化技術開発事業
１．事業の目的・政策的位置付け …… 24
２．研究開発目標 …… 30
３．成果、目標の達成度 …… 32
４．事業化、波及効果について …… 45
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 …… 51

A2.　高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発事業
１．事業の目的・政策的位置付け …… 59
２．研究開発目標 …… 61
３．成果、目標の達成度 …… 67
４．事業化、波及効果について …… 91
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 …… 98

Ｂ．高効率ガスタービン技術実証事業
B1. 1700℃級ガスタービン技術実証事業
１．事業の目的・政策的位置付け …… 103
２．研究開発目標 …… 111
３．成果、目標の達成度 …… 118
４．事業化、波及効果について …… 139
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 …… 147

B2. 高湿分空気利用ガスタービン技術実証事業
１．事業の目的・政策的位置付け …… 155
２．研究開発目標 …… 159
３．成果、目標の達成度 …… 167
４．事業化、波及効果について …… 196
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 …… 203

Ｃ．先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発事業
１．事業の目的・政策的位置付け …… 207
２．研究開発目標 …… 212
３．成果、目標の達成度 …… 220
４．事業化、波及効果について …… 244
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 …… 245

Ｄ．次世代型双方向通信出力制御実証事業
１．事業の目的・政策的位置付け …… 251
２．研究開発目標 …… 255
３．成果、目標の達成度 …… 258
４．事業化、波及効果について …… 302
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 …… 303

Ｅ．太陽光発電出力予測技術開発実証事業
１．事業の目的・政策的位置付け …… 309
２．研究開発目標 …… 311
３．成果、目標の達成度 …… 314
４．事業化、波及効果について …… 351
５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 …… 352

第４章　技術に関する施策評価
１．施策の目的・政策的位置付けの妥当性 …… 358
２．施策の構造及び目的実現の見通しの妥当性 …… 361
３．総合評価 …… 364

第５章　技術に関する事業評価
Ａ．高効率ガスタービン実用化技術開発事業
A1.　1700℃級ガスタービン実用化技術開発 …… 368
A2.　高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発 …… 370
Ｂ．高効率ガスタービン技術実証事業
B1. 1700℃級ガスタービン技術実証事業 …… 373
B2. 高湿分空気利用ガスタービン技術実証事業 …… 376
Ｃ．先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発事業 …… 378
Ｄ．次世代型双方向通信出力制御実証事業 …… 381
Ｅ．太陽光発電出力予測技術開発実証事業 …… 383

第６章　今後の研究開発の方向等に関する提言 …… 385

第７章　評点法による評点結果 …… 391

参考資料
参考資料１　実施事業者提供資料
参考資料２　各実施事業に係る困難事例について
参考資料３　今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針
参考資料４　経済産業省技術評価指針
参考資料５　経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準
参考資料６　平成22年度次世代電力供給システムに係る技術に関する施策・事業評価報告書（概要版）

次世代電力供給システム分野に係る
技術に関する施策・事業評価報告書

概　要

技術に関する施策・事業評価報告書概要

技術に関する施策

技術に関する施策名	次世代電力供給システム分野に係る技術に関する施策・事業
担当課	資源エネルギー庁　電力基盤整備課

技術に関する施策の目的・概要

昨今、気候変動問題への対応が地球規模の課題となっている中、化石エネルギーの利用に伴う温室効果ガスの排出抑制に関する関心が高まっている。

特に我が国では、東日本大震災以降、原子力発電所の定期検査入りに伴い、国内電源構成に占める火力発電の割合は、約９割まで上昇しており、2030年以降も火力発電は我が国の電源構成の中で重要な位置づけを占める予定である。

石炭は他の化石燃料と比べ、可採年数が約143年と長く、世界各国に幅広く分布する等、供給安定性が高く、経済性に優れることから、我が国にとって、今後とも石油代替エネルギーの重要な柱の一つとなる。また、天然ガスは化石燃料の中で、安定的かつクリーンなエネルギーであり、環境規制の厳しい都市圏での大気汚染防止対策上、極めて有効な発電用燃料として導入されている。

しかし、発電時に発生する単位当たり二酸化炭素排出量は他の電源に比べて大きく、地球環境問題での制約要因が多いという課題を抱えている。

また、我が国は世界最大の石炭および天然ガス輸入国であり、資源のほぼ100%を海外に依存している。よって、エネルギーの有効利用と環境負荷の低減に努めるため、我が国は長年にわたり化石エネルギーの利用技術の効率化に積極的に取り組むとともに、環境に適した世界最高水準の火力発電技術の開発・利用を実現してきたところである。

一方、温室効果ガスの排出抑制・エネルギー自給率向上、エネルギー源多様化、環境関連産業育成等の観点から、我が国は太陽光発電等の再生可能エネルギーの導入を進めているが、電力系統上の課題として、①余剰電力の発生や、②出力変動に伴う周波数変動調整力の不足、③配電系統における電圧上昇　等が指摘されているところである。よって、再生可能エネルギーの導入拡大に伴う電力系統上の課題への対策を進めなければ、我が国の電力の安定供給を阻害するおそれがある。

したがって、今後、再生可能エネルギーが導入拡大されることで電源が多様化する電力を効率かつ安定的に供給するため、送配電系統や発電運用技術の高度化を行い、送電効率の向上、余剰電力対策等の系統安定化対策を行うことで、環境対策および電力の安定供給を可能とする強靱な電力供給システムを確立していく必要がある。

将来に向けた世界的な気候変動問題の制約下で、環境負荷を低減させることを目的とした電力の安定供給にかかる技術開発は、我が国の環境及びエネルギー政策上極めて重要な施策である。

技術に関する事業一覧

Ａ．高効率ガスタービン実用化技術開発事業

A1　1700℃級ガスタービン実用化技術開発事業

A2　高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発事業

Ｂ．高効率ガスタービン技術実証事業

B1　1700℃級ガスタービン技術実証事業

B2　高湿分空気利用ガスタービン技術実証事業

Ｃ．先進超々臨界圧火力発電実用化技術開発事業

Ｄ．次世代型双方向通信出力制御実証事業

Ｅ．太陽光発電出力予測技術開発実証事業

技術に関する施策評価の概要

１．施策の目的・政策的位置付けの妥当性

（１）施策の目的の妥当性

原子力発電の将来性が不透明な現状では、再生可能エネルギーの本格的導入に先立ち、火力発電設備の高効率化及び環境負荷の低減化は不可欠の技術課題であり、その意味においても本施策の目的の妥当性は明らかである。また、上述のように諸情勢が大きく変化する中で、安定供給を確保し、温室効果ガスの排出抑制を進めるためには、電力供給システムの技術向上を図ることが極めて重要であり、目的の妥当性は高い。

なお、全てが即座に国内外に適用できるものであるかは、疑問があるところ。現在取り組んでいる技術・研究が、どういった条件・環境において、その成果を発揮するのか、あるいはどういった条件が成立したときに経済的有利になるか、そして具体的な適用先・時期についてはどういった考え方なのか(どういった仮説を設定しているのか)、条件を明確にする必要があると考える。

（２）施策の政策的位置付けの妥当性

本施策の位置付けは、2013 年の「日本再興戦略」にも合致するもので、火力発電技術の高効率化と効率的なエネルギー流通技術の開発に関して、世界の中で主導的役割を果たしてきた我が国の開発・研究スタンスを一層確固たるものにする効果が期待できる。これにより国際的な施策動向を我が国が先導する立場に立てる可能性がある。

また、環境エネルギー技術革新計画に基づき、中長期的な技術ロードマップを見据えた上で背景やわが国の技術開発の動向・課題を整理し計画されており妥当と考える。

更に、国内はもちろんのこと、電力分野における日本発の最先端技術を海外に展開し、エネルギー問題や温暖化対策等で貢献していく姿もしっかり示されており妥当であると考える。

なお、ライフサイクルコストを踏まえた検討も加えていただければ、より適用先が明確になると考える。そこに何らかの課題がある場合はそこを明確にした上で整理し、将来の技術開発につなげる仕組みが必要でないか。

（３）国の施策として妥当であるか、国の関与が必要とされる施策か。

本施策のような電力・エネルギー関連分野は，長期にわたる研究開発期間と多額の資金を必要とするもので、その事業化を考えても、国として取り組むべき施策であると考える。また、本施策はエネ

ルギー政策上、重要な施策であり、関連する産業・企業が多く、また、海外への事業展開が可能な分野でもあることから、国が積極的に関与する必要があると考えられる。

なお、一部に国が関与するには、まだ時期尚早の技術もある。

２．施策の構造及び目的実現の見通しの妥当性

（１）現時点において得られた成果は妥当か。

一部のプロジェクトはすぐに活用に至らないものもあるが、国内外の情勢変化に対応できるように開発が行われている。また、いずれの技術分野においても当初設定された計画通り、あるいは、計画を上回る成果が得られている。

なお、震災以降、電力供給システムをめぐる環境は大きく変化し、リスクの捉え方も異なってきている。本案件に置き換えれば、高効率火力発電に対する期待は、従前より大きくなっており、技術開発については、より加速する必要があると考える。また、一部の技術において、情報不足のため、成果の妥当性が評価できないものがある。

（２）技術に関する施策の目的を実現するために技術に関する事業（プロジェクト等）が適切に配置されているか。

火力発電技術開発と送配電技術開発が適切に配置されている。火力発電技術に関しては、大容量機と中小容量機の 2 つの側面から事業が進展しており，既に実施期間が終了している IGCC（Integrated coalGasification Combined Cycle：石炭ガス化複合発電）を含めて、また、いずれもの分野においても着実に成果が上がっていることから、配置は適切であると考える。

なお、送配電技術開発については、さらなる事業の追加等による施策の拡充が期待される。また、電源を含めた電力供給システムを巡る環境の大きな変化を踏まえた場合、事業配置の見直し評価が期中であっても良かったのではないか。

３．総合評価

東日本大震災によって明らかになった既存の電力供給システムの問題、原子力情勢の変化、国際資源情勢の変化、地球環境問題の深刻化などを考慮すると、電力供給システムの技術向上を図ることは国の施策上極めて重要な課題と考えられる。中でも、火力発電、送配電に関わる技術開発は、エネルギーコストの低減、供給安定性の向上、環境性の向上などにつながる上に、日本の優位性を高め、事業の国際展開を容易にするといった効果も期待できる。本年度の対象事業は、火力発電の高効率化に関わる技術開発分野を中心に、設定された目的に関して、計画通り、あるいは、計画を上回る成果を上げており、高く評価できる。

なお、事業開始以降に事業目的の前提となる状況に変化が生じた場合は、事業の内容や実施方法を適時修正すべきである。また、計画時点に比較して、本技術に対する社会の期待はより大きくなるなど、社会環境の変化が大きい時代である。そういった時代の中で、必要に応じて研究を加速・減速できる（させる）仕組みが必要であると考える。

<u>今後の研究開発の方向等に関する提言</u>

今後も地球温暖化対策に資する技術（再生可能エネルギーの導入促進、効率改善）を推進すべき。

火力発電技術開発と送配電技術開発については、施策の目的と位置付けは明確に示されており、今後も継続的な研究・開発を行っていく必要がある。特に火力発電技術は、1700℃級ガスタービンの開発やAHAT（advanced Humid Air Turbine：高湿分空気利用ガスタービン）が、例えば石炭ガス化技術IGCCの事業化を推し進める役割を果たすように、様々な個別技術を統合・連携する施策が必要である。このためにも国が積極的に関与・支援して、エネルギー対策を推し進めるべきであり、それにより、各企業や大学の研究レベルも向上し、ひいては我が国の技術レベルの底上げが期待できる。

また、優位性のある国産技術の海外展開に資する最先端の技術開発分野に優先的に取り組むべき。例えば、本年度の主な対象事業にもなっている高効率発電は、我が国の企業群が、素材の開発・製造・加工、部品・部材の設計・製造、プラントの設計・施工・運営、メンテナンス、改良などを一貫体制で実施でき、また、国内での新増設やリプレース需要だけでなく、市場規模が極めて大きい海外での事業展開も期待できるだけに、今後も、国が主導して技術開発を推進すべき。

更に、日本のビームやレーザを使った最新の評価技術を駆使して、材料開発の成果を確かめることができる。評価することができれば、そこに進歩する方法が見つかる。基礎的開発はこの評価が大きなコストになるが必要となる。

機械工学、電気工学、情報工学などの大きな進歩が総合的に組み合わされて大きな進歩になる。

その分野の専門家ばかりではなく、異分野との交流が思わぬ発展のもとになる。

技術に関する事業

技術に関する事業名	Ａ．高効率ガスタービン実用化技術開発事業 A1．1700℃級ガスタービン実用化技術開発事業
上位施策名	省エネルギーの推進
担当課	資源エネルギー庁　電力基盤整備課

事業の目的・概要

電力産業の保守高度化とリプレース需要にあった大容量機の高効率化を目指し、目標コンバインド効率 56%以上、CO2 排出量８%削減（現状同容量機比）を達成するために必要な、1700℃級ガスタービンの実用化を図る。

そのため、1700℃級ガスタービンの実用化に必要な要素技術開発を行い、システムの成立性をシミュレーションにより確認する。

予算額等（補助（補助率：2/3））　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２０年度	平成２３年度	平成２２年度	平成２５年度	三菱重工業
H21FY 予算額	H22FY 予算額	H23FY 予算額	総予算額	総執行額
559,194	615,315	689,110	2,187,619	1,878,273

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

要素技術	目標･指標	成　果	達成度
全体目標	コンバインド効率56%以上（送電端、HHV）	最新のデータを反映した予想値は56%（HHV）を上回る目途を得た。	達成
①排ガス再循環システム／低NOx燃焼器の開発	NOx排出量50ppm以下	実機相当圧力でNOx排出量16ppmを確認した。	達成
②高性能冷却システムの開発	冷却空気量30%低減（事業発足時比）	冷却空気量30%低減（事業発足時比）の目処を得た。	達成
③低熱伝導率TBCの開発	遮熱効果を現状材(YSZ)より20%向上	遮熱効果を現状材(YSZ)より20%向上低減した。	達成
④高負荷・高性能タービンの開発	1500℃級ガスタービンに比べ30%高い負荷条件において、１軸タービン、段数従来並みで、効率91%以上	回転翼列試験により91.3%の効率達成の目処が得られた。	達成
⑤高圧力比高性能圧縮機の開発	圧力比30以上において、１軸圧縮機、段数従来並みで、効率89%以上	回転翼列試験により、89.3%の効率達成の目処が得られた。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし

＜共通指標＞

論文数	投稿	発表	特許等件数（出願含）
5	10	42	37

総合評価概要

多くの技術的課題を克服して 1700℃級ガスタービン実用化に向けた多くの成果を得るとともに、数多くの技術的知見を得て、当該分野の発展に大きく寄与したことは高く評価できる。特に本事業の開発成果は、関西電力姫路第二発電所に設置された世界最高温度レベルである 1600℃級ガスタービンに導入され、技術的成果、目標の達成度は十分実証されている。

なお、成果、目標の達成度について、全て「達成」と説明されているが、達成に至るまでの過程で問題や課題が生じていた場合は、その内容や対処状況なども報告すべきである。また、高効

率化とともに保守合理化によるコスト低減も視野に入れて対応するとともに、現在ある、1300℃及び1500℃級のガスタービン発電での課題について明確にした上で、その課題に対して、どのような技術進歩・改良を行っているか明確にする必要があると考える。

今後の研究開発の方向等に関する提言

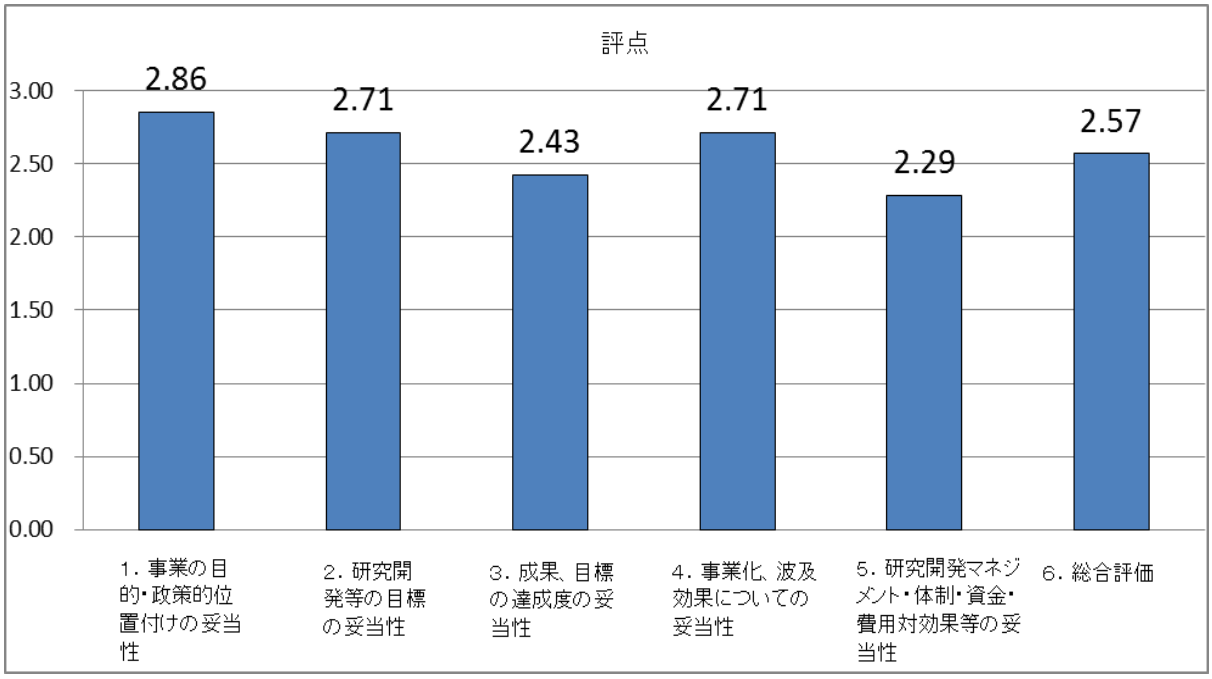
なし

評点結果

評点法による評点結果

（A1 1700℃級ガスタービン実用化技術開発事業）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.86	3	2	3	3	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.71	2	3	3	3	3	3	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.43	2	2	3	3	3	2	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.71	3	3	3	3	3	2	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ･体制･資金･費用対効果等の妥当性	2.29	2	2	3	3	2	2	2
6. 総合評価	2.57	3	2	3	3	3	2	2



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ａ．高効率ガスタービン実用化技術開発事業 A2. 高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発事業
上位施策名	省エネルギーの推進
担当課	資源エネルギー庁　電力基盤整備課

事業の目的・概要

小中容量機（10 万 kW 程度）の高効率化（45%→51%）のために有望とされている高湿分空気利用ガスタービン（AHAT）の実用化に必要な多段軸流圧縮機、多缶燃焼機器等の開発を行うとともにシステムの信頼性等の検証を実施する。

予算額等（補助（補助率：2/3））　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２０年度	平成２３年度	平成２２年度	平成２５年度	日立製作所等
H21FY 予算額	H22FY 予算額	H23FY 予算額	総予算額	総執行額
1,085,495	2,465,865	1,032,121	4,799,481	4,571,171

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

要素技術	目標・指標	成果	達成度
①高湿分 軸流圧縮機	・吸気噴霧量:3.5%以上	最大1.7%の噴霧試験によりアルゴリズムの妥当性を確認した。そのアルゴリズムを用いて3.5%噴霧時の信頼性を確認した。	達成
②高湿分 再生熱交換器	・温度効率:90%以上 ・伝熱面密度:1000m^2/m^3以上	高性能フィンの開発により伝熱面密度1160m^2/m^3を実現した。総合試験で温度効率91.3%、圧力損失は仕様値以内を達成した。	達成
③高湿分 多缶燃焼器	・NOx:10ppm以下	点火、昇速、加湿、吸気噴霧時の安定燃焼を確認した。湿分が飽和条件となるフルAHATシステムの条件で、NOx濃度10ppm以下の見通しを得た。	達成
④高湿分冷却翼	・冷却効率 静翼:70%以上 動翼:60%以上	高湿分低温空気を利用したハイブリッド冷却静翼を製作し、冷却効率70%以上を確認した。	達成
⑤3MW級検証機	・AHATプラント側の特性把握	システム特性、機器性能の向上、主要機器の経時変化ないことを確認した。	達成
⑥実用化技術 総合試験	・発電用ヘビーデューティー ガスタービンにAHATを適用	累計65時間運転し、吸気噴霧冷却、加湿管、再生熱交換器、高湿分冷却翼などの相互作用(性能)を確認、課題摘出した。	達成
⑦AHAT特性解析	・ユーザ視点からの システム評価	定格出力時の性能だけでなく、大気温度変化特性、部分負荷・起動特性を明らかにした。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし

＜共通指標＞

論文・解説	特許（公開）	国際会議発表	国内会議発表
18	41	12	10

総合評価概要

高湿分空気を利用してシングルサイクル発電の高効率化を図る実証技術は、全く未知であった分野に積極的に挑戦して、0.3 万 kW 級実証試験及び 4 万 kW 級試験で着実に成果を挙げており、これまでの進捗状況は高く評価できる。短期間でこれほどまで実証試験が遂行され、高湿分空気の圧縮機、熱交換器、燃焼器、冷却翼に対する影響が詳細に調査され、貴重な実験データも蓄積された。開発・研究のスピードも迅速であり、液滴工学や微粒化技術、その関連分野の急速な発展も誘起した。本技術は同規模のコンバインド発電と比較して、高い効率が安価で得られることが期待できる。10 万 kW 程度の中小容量発電の実用化技術として、今後の成果や実証が望まれる。

また、本事業が実用化されれば、国内で中小容量機の新増設やリプレースやスマートエネルギーシステムの中核発電機などとしての新規導入が期待され、海外でも幅広い国・地域に展開が期待できる有望技術と考えられる。

なお、予想される用途、設置条件、経済条件などを勘案すると、国内外で事業展開を図るためには、報告書で説明された内容に加え、小型化・省スペース化、メンテナンス性の向上、コストなどが課題になると思われる。より高い事業成果につなげるため、これらの目的に関する技術開発及び成果についても報告すべき。

また、本技術は、現在の延長で考える条件下では、経済的な有利性・効果に疑問が生じる。どういった条件・環境になった場合、本技術開発が有益なのか・経済的なのか、適用できるのか、前提条件を十分に示した上で、その条件の評価を含めた全体評価を行う必要があると考える。また、研究開始前と現在との条件の変化も含めた自己評価をすべき。

今後の研究開発の方向等に関する提言

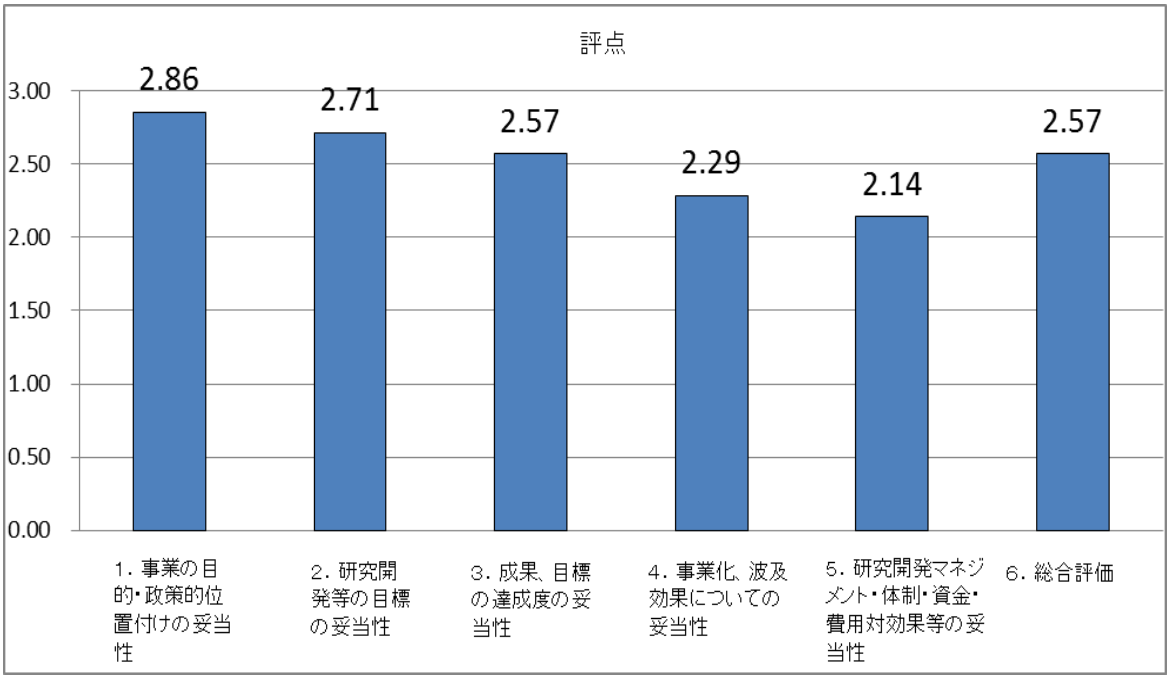
なし

評点結果

評点法による評点結果

（A2 高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発事業）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.86	3	3	3	3	3	2	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.71	2	3	3	3	3	2	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.57	2	2	3	3	3	2	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.29	3	2	3	3	2	1	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.14	2	2	3	3	2	1	2
6. 総合評価	2.57	3	2	3	3	3	2	2



技術に関する事業

技術に関する 事業名	Ｂ．高効率ガスタービン技術実証事業 B1．1700℃級ガスタービン技術実証事業
上位施策名	省エネルギーの推進
担当課	資源エネルギー庁　電力基盤整備課

事業の目的・概要

電力産業の保守高度化とリプレース需要にあった大容量機の高効率化を目指し、目標コンバインド効率57%以上を達成するために必要な、1700℃級ガスタービンの実用化を図る。

そのため、1700℃級ガスタービンの実用化に必要な要素技術開発と実証機の開発・製作・実証運転を行う。

予算額等（補助（補助率：2/3））　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２４年度	平成３２年度	平成２５年度	－	三菱重工業
H24FY 予算額	H25FY 予算額	－	総予算額	総執行額
1,255,048	1,180,585	－	14,050,000	1,009,716

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

要素技術	目標・指標　（中間評価時点）	成果　（中間評価時点）	達成度
①低熱伝導率遮熱コーティング	・厚さ0.5mm以上 ・熱疲労寿命が従来並み ・エロージョン試験装置製作および試験着手。	・厚さ0.5mm以上の成膜条件で、熱疲労寿命が従来並みであることを確認した。 ・エロージョン試験装置を製作し、試験に着手した。	達成
②高性能冷却システム	・実機燃焼器＋タービン翼列の気流・伝熱試験による端壁面での詳細データ取得。	・タービン翼列の気流試験・伝熱試験による端壁面での詳細データを取得した。	達成
③非定常性制御燃焼技術	・排ガス再循環有、NOx　40ppm以下を確認する。 ・燃焼器内気流データの取得。 ・実機燃焼器形態での火炎形状の把握。 ・燃焼を不安定にする領域を特定する。	・排ガス再循環有、NOx　16ppmを確認した。 ・燃焼器内気流データを取得した。 ・実機燃焼器形態での火炎形状を計測した。 ・燃焼を不安定にする領域を特定した。	達成
④超高性能タービン	・タービン効率向上コンセプトの抽出 ・排気ディフューザの改良を行い、圧力損失５０%低減 ・励振力発生のメカニズムの考察・解明	・タービン効率向上コンセプトを抽出し、試設計とシミュレーションで妥当性を確認した ・排気５０%圧力損失低減を確認した。 ・励振力データを取得し現象のメカニズムを考察・解明した。	達成
⑤境界層制御高性能圧縮機	・前方段の負荷を＋10%高めた条件で、段効率+1%向上 ・中後方段に対し、多段条件での動翼チップクリアランス流れデータを取得。 ・多段モデル圧縮機試験装置の計画	・前方段の負荷を約10%高め、段効率+1%向上を確認した。 ・多段条件での動翼チップクリアランス流れデータを取得。 ・多段モデル圧縮機試験装置の計画、一部製造に着手した。	達成

要素技術	目標・指標　（中間評価時点）	成果　（中間評価時点）	達成度
⑥超高性能サイクル	・エクセルギ分析・評価	・発電効率57%以上の達成目途。 ・エクセルギ損失の発生部位を定量評価した。	達成
⑦高機能構造技術	・各種構造コンセプトの比較検討 ・1600℃級でクリアランスデータの取得準備	・構造コンセプトを考案し、比較検討を実施。 ・データ取得準備完了。11月に計測予定。	達成
⑧ 高 性 能 シール	・リーフシール基礎試験装置の製作とデータ取得	・リーフシールの基礎データを取得した。	達成
⑨先進製造技術	・長穴加工L/D>250 ・溶接変形の20%以上低減 ・高強度の中子・鋳型の候補材抽出	・長穴加工を実施し、L/D＞250を達成した。 ・レーザー溶接工法最適化で、変形を20%低減目途を得た。 ・鋳型原料・スラリー条件を決定し、候補材を抽出した。	達成
⑩超高温強度評価技術	・高温域での設計に向けた材料データ取得 ・超高温域長時間使用後データ取得に着手	・高温域での材料データを取得した。 ・試験に着手。5000hr後のデータはH25年度末に完了予定。	達成
⑪特殊計測技術	・高温での動翼振動計測技術（非接触）の開発と計測実施 ・高温での動翼チップクリアランス計測準備	・実機ガスタービンで、翼振動データを取得た。 ・チップクリアランスセンサーを開発、11月に計測予定	達成
⑫検査技術	・直径φ0.7mmのき裂検知極小センサの試作 ・試計測の実施により、検知精度0.5mm	・直径φ0.7mmの極小ファーバースコープセンサーを試作。 ・0.5mmのき裂検知の目途を得た。	達成
⑬ダンパ振動制御技術	・振動数やダンピングの基礎データ取得	・基礎データを取得し改良ダンパの検討に着手した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし

＜共通指標＞

論文数	投稿	発表	特許
6	7	15	22

総合評価概要

1600℃級ガスタービン（J形）で培った技術をベースとして1700℃級の実証を行う事業であるが、その前半の 4 年間で要素技術開発を行う計画であり、技術的課題を着実に整理・解決しながら開発を行っていく姿勢は高く評価できる。特に TBC（Thermal Barrier Coating：遮蔽コーティング）技術、非定常計測に基づく不安定燃焼の制御技術、特殊計測技術などは世界に誇れる日本の革新的技術となるだけでなく、この開発過程において解決される技術的課題は、関連学問分野を大きく牽引することが期待できる。

1700℃級ガスタービンの実用化技術開発では、送電端効率56%（HHV（Higher Heating Value：高位発熱量））という高い目標を設定していたが、研究開発が順調に進展し、実証事業では更に高い効率に目標を設定し直し、挑戦的開発が続いている。各種試験結果が定量的に評価されてきた成果であると考える。

経済性にも優れ、将来的には石炭や固体バイオマス燃料をガス化することで、例えば IGCC の主機としての適用も期待される技術で、事業として早い完成が期待される。

また、超高効率ガスタービンに係る技術分野では、日本企業が素材の開発・加工から、部品・部材の設計・製造、プラントの設計・施工・運営の各分野で世界をリードしているが、1700℃級ガスタービンを諸外国に先駆けて実用化できれば、極めて大きな事業成果につなげることができると考えられる。また、各要素技術の開発が計画通り順調に進んでおり、高く評価できる。

更に、高効率ガスタービンは、今後の火力発電効率化の鍵を握る主要技術であるとともに、環境負荷低減につながる技術でもある。実証事業の加速化も視野に入れて対応すべき。

なお、送電端効率57%（HHV）という非常に挑戦的な目標を定めているので、実証事業で予期せぬトラブルの発生により、研究・開発速度の遅れが危惧される。実証機の開発と製造及びその実証試験で十分なデータを取得するのに、5年間の実施期間で十分であるか疑問がある。

また、実用化技術開発段階での目標（送電端効率56%）に比べて、1%高い目標設置を可能とした技術的根拠を明らかにすべき。

成果、目標の達成度について、全て「達成」と説明されているが、達成に至るまでの過程で当初想定されていなかった問題点や課題が生じていた場合は、その内容や対処状況なども報告すべき。

保守コスト低減に向けた取組みも必要。実際に運用するにあたっては、取替基準等の評価が課題となるため、高温部品の損傷・劣化機構の解明と余寿命評価、保守管理手法等に関する開発も視野に入れて対応すべき。

今後の研究開発の方向等に関する提言

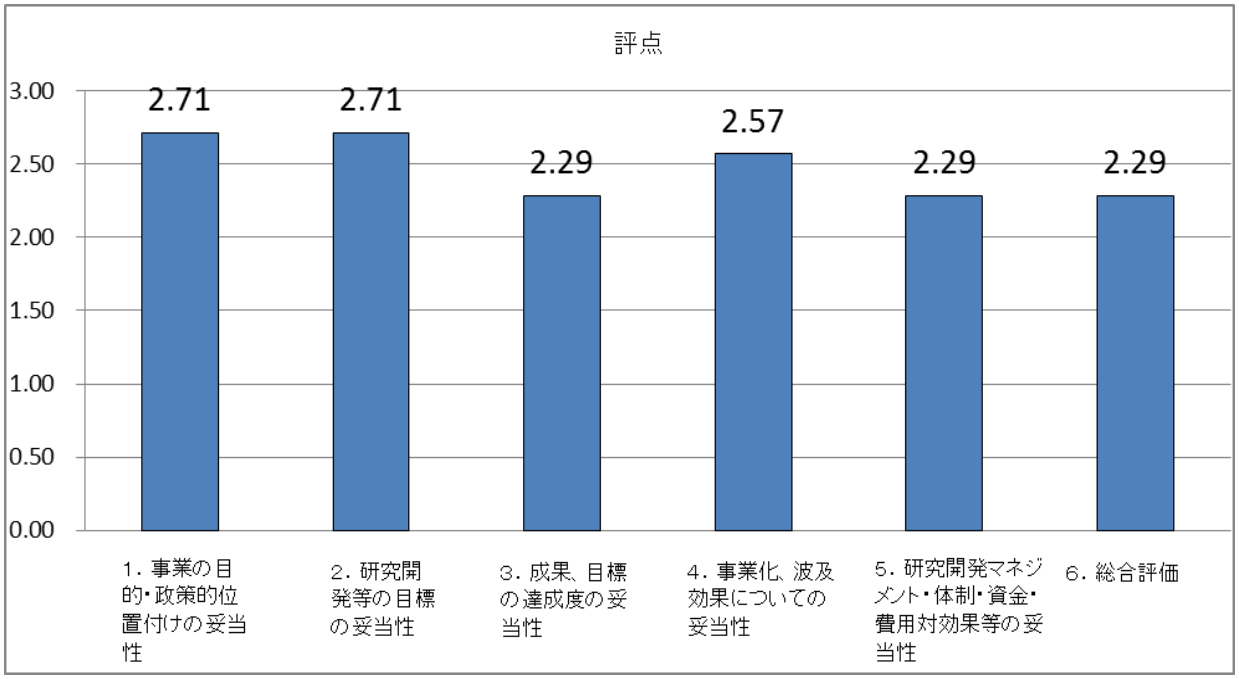
タービンなどの寿命がメンテナンスコストを決めるので効率ばかり追わないで総合的に捉える必要がある。オリジナルな技術が1つでも必要である。国際標準化戦略で差を付ける。そして、国際プロジェクト化して日本がリーダーとなることが重要。

評点結果

評点法による評点結果

（B1 1700℃級ガスタービン技術実証事業）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.71	2	2	3	3	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.71	2	3	3	3	3	3	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.29	2	2	3	3	2	2	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.57	3	3	3	3	2	2	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ･体制･資金･費用対効果等の妥当性	2.29	2	2	3	3	2	2	2
6. 総合評価	2.29	2	2	3	3	2	2	2



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｂ．高効率ガスタービン技術実証事業 B2．高湿分空気利用ガスタービン技術実証事業
上位施策名	省エネルギーの推進
担当課	資源エネルギー庁　電力基盤整備課

事業の目的・概要

電力産業の短中期的ニーズに対応する中小容量機（10 万 kW 程度）の高効率化のために、高湿分空気利用ガスタービン（AHAT）の実用化に必要な多段軸流圧縮機、多缶燃焼器等の開発を行うとともにシステムの長期信頼性等の実証等を行う。

予算額等（補助（補助率：2/3））　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成２４年度	平成３２年度	平成２５年度	－	日立製作所等
H24FY 予算額	H25FY 予算額	－	総予算額	総執行額
714,527	1,072,600	－	38,271,127	679,447

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

要素技術	目標･指標(中間評価)	成果	達成度
(1)高湿分 圧縮機	チップカット技術※の確立 (※翼先端部をカットして吸込み流量を削減する技術)	既存の圧縮機に対する流量削減方法を検討し、チップ径カットによって効率達成と信頼性確保を両立する見通しを得た。	達成
(2)蒸発 促進技術	3次元数値解析と蒸発予測アルゴリズムの併用による予測手法の構築	液滴挙動の影響を組み込んだ3次元数値解析手法の妥当性を確認し、吸気部の解析に適用した。	達成
(3)高湿分 冷却翼	･熱負荷低減構造の有効性確認 ･タービン内部流れの詳細計測技術の開発	･熱負荷低減のための基本構造を考案し、解析により有効性を確認した。 ･タービン内部流れを模擬する環状セクター試験装置と計測装置を製作した。	達成
(4)高湿分 燃焼器	･多様化燃料の燃焼特性評価技術 ･燃焼器冷却技術	･要素燃焼試験装置を開発した。 ･燃焼解析，冷却促進技術を開発した。	達成
(5)スケール アップ技術	･材料面、構造面での信頼性確保技術の開発 ･充填物式水回収装置の性能検証、予測手法確立	･コア接合溶接の最適条件を検討、確認した。耐食処理条件を検討し、成膜品質の改良を確認した。 ･1/60規模の水回収試験装置を設計製作しデータ取得、性能予測手法を確立した。	達成
(6)40MW級 総合試験	･開放点検による機器健全性確認 ･定格出力による運転 ･部分負荷、起動特性の評価	･ガスタービンの内部開放点検により、加湿運転後の健全性を確認した。 ･定格出力により一定時間(ヒートラン)運転した。 ･加湿による効率向上、3MWより高い部分負荷特性が得られた。	達成
(7)実証機試験	実証機の体制、方法の検討	実証機の実施形態を検討した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし

＜共通指標＞

論文数	投稿	発表	特許
6	7	15	22

総合評価概要

現在までに0.3万kW級実証試験および4万kW級試験装置を用いてデータの取得と実証試験を行ってきた経緯があり、最終的な目標である10万kW級の中小容量機の高効率化実証に向けて準備は整っていると考える。ただし、実用化に向けて必要となる技術課題は依然として多く残されており、それを平成27年度までの期間に集中して行い、その後、実証試験に移るという計画もおおむね妥当であると考える。

本事業の実用化段階では、既設の同容量機と比して10%程度も高い効率の実現が期待できるため、我が国における需要は高く、費用対効果も極めて高いと考える。

また、本事業は将来的に水素燃焼ガスタービンや IGHAT（Integrated coalGasification Humid Air Turbine：石炭ガス化湿分空気利用ガスタービン）へ応用することも検討されており、高い波及効果を有している。現在までに、国内外から高い評価を得ている国産の技術であり、事業化も期待されているので、現在までの開発速度を落とすことなく開発・研究が進展することを期待する。

なお、バイオマス起源のガス燃料への適用技術など、ガスタービンの燃料多様化技術は重要である。バイオガスは一般的に発熱量が低いため、ことに高湿分空気中での燃焼特性はLNGとは大きく異なることが予想されることから、基礎的燃焼特性の把握など、大学などとの共同研究が望まれる。

また、発電規模に対する開発コストを勘案すると、相当の費用圧縮が必要と思われる。

更に、本技術については日本オリジナルな技術であるところから、標準化、規格化に取組むことにより世界をリードしていく意味でプロジェクトの国際化をするべきで、その結果として国標準化を目指すべきである。

今後の研究開発の方向等に関する提言

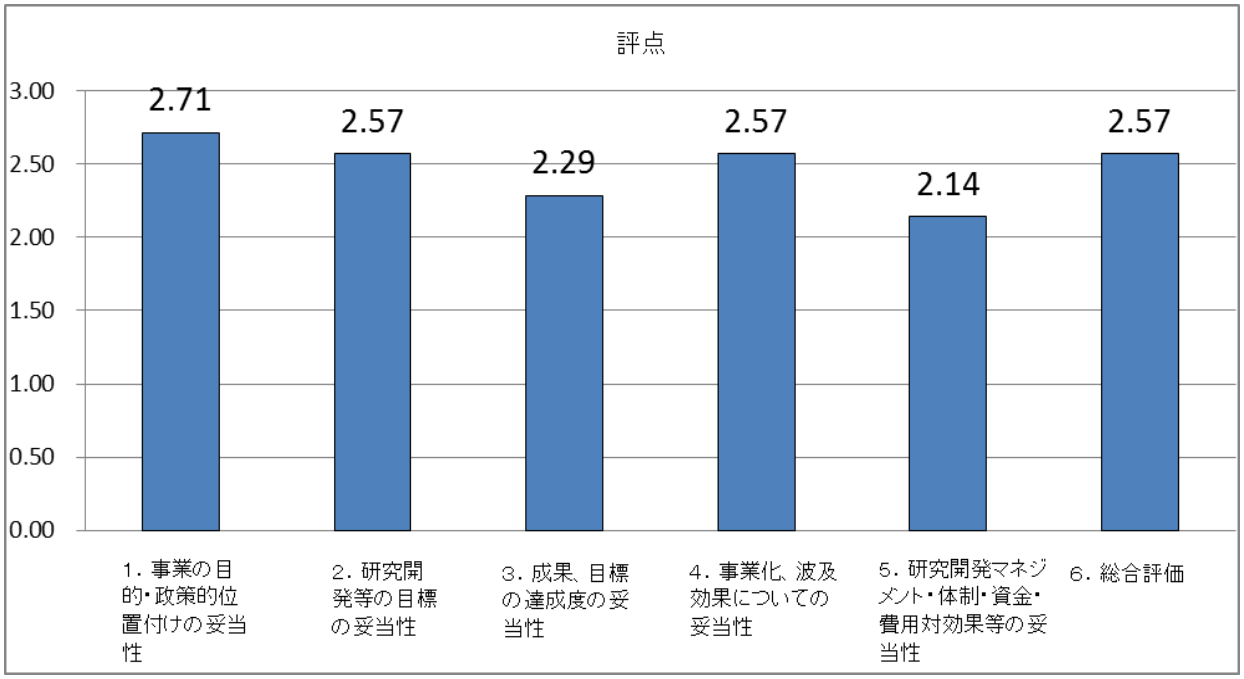
なし

評点結果

評点法による評点結果

（B2 高湿分空気利用ガスタービン技術実証事業）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.71	2	3	3	3	3	2	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.57	2	3	3	3	3	2	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.29	2	2	3	3	2	2	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.57	3	3	3	3	2	1	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ･体制･資金･費用対効果等の妥当性	2.14	2	2	3	3	2	1	2
6. 総合評価	2.57	2	3	3	3	2	2	3



技術に関する事業

技術に関する事業名	C．先進超々臨界圧発電実用化要素技術開発事業
上位施策名	エネルギー源の多様化・エネルギーの高度利用
担当課	資源エネルギー庁　電力基盤整備課

事業の目的・概要

従来型石炭火力発電の中で最高効率である超々臨界圧火力発電（USC）は、蒸気温度の最高温度は、630℃程度（送電端熱効率 42～43%）が限界と言われてきた。しかしながら、近年の材料技術の進歩により、700℃以上の蒸気温度を達成できる可能性が見えてきたことから、これらの材料を活用した先進超々臨界圧火力発電（A-USC）の開発を行う。

A-USC は、蒸気温度 700℃級で 46%、750℃級で 48%の高い送電端効率の達成が可能な技術であり、2020 年以降増大する経年石炭火力発電のリプレース及び熱効率向上（二酸化炭素排出量低減）需要に対応するため、早急に技術開発を進める必要がある。

予算額等（補助（補助率：2/3））　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	中間評価時期	事業実施主体
平成２０年度	平成２８年度	平成２２年度	平成２５年度	民間事業者 10 社
H23FY 予算額	H24FY 予算額	H25FY 予算額	総予算額	総執行額
1,099,942	1,102,598	1,524,469	9,000,000	3,595,042

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

①システム設計、設計技術開発

要素技術	目標･指標	成　果	達成度
システム設計 設計技術	システム設計により熱効率46%以上、発電コストが従来USCと同等	熱効率46%を確認した。 従来のUSC並み以下の発電コストであることを確認した。	達成

②ボイラ要素技術開発

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
ボイラ要素技術	6種類のNi基合金と3種類の9Cr鋼で大径管、小径管を試作し、3万時間程度の材料試験を実施した。	3万時間程度の試験結果を10万時間まで外挿することにより、材料強度の目標を達成できる見通しを得た。 今後、実際に10万時間まで試験を継続し、確認をする。	達成

③タービン要素技術開発

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
タービン要素技術	ロータ、ケーシング候補材料について、3万時間程度の材料試験を実施した。	3万時間程度の試験結果を10万時間まで外挿することにより、材料強度の目標を達成できる見通しを得た。 今後、実際に10万時間まで試験を継続し、確認をする。	達成

④高温弁要素技術開発

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
高温弁要素技術	要素試験により材料選定作業を行う。	弁材料の摺動試験、水蒸気酸化試験等を実施し、700℃条件下で使用できる材料の組合せがあることを見出した。実機高温弁の設計を実施し、鋳造による大型弁ケーシングの製造性を確認した。	達成

⑤実缶試験・回転試験

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
実缶試験・回転試験	試験設備の基本設計を完了する。	試験設備の基本設計を完了した	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし

＜共通指標＞

論文数	学会誌等 投稿数	発表数	特許件数
10	7	59	1

総合評価概要

A-USC（Advanced Super Critical：先進超々臨界圧）発電技術は、我が国の昨今のエネルギー事情を考えると不可欠の技術であり、着実に計画に則った成果を挙げていると判断する。蒸気温度を 700℃以上に上昇させることで高温となるボイラ、タービン、高温弁の材料開発を中心とした試験時間の長い開発・研究を継続的に行っており、現在までに得られたデータは貴重である。特に 3～7 万時間にも及ぶ材料の長期高温試験からは、貴重な成果と知見が得られることと考える。これらの基礎データから 10 万時間の材料特性を外挿によって推定する過程の不確かさが懸念であったが、試験データを見る限り、現在までは妥当な結果が得られていると評価できる。

本事業の波及効果としては、ガスタービンコンバインドサイクルへの導入による高効率化が挙げられ十分に大きいと判断できる。

以上より現時点での中間評価としては十分な成果であり、これを基にした今後の実証機検証を期待したい。

なお、現在のUSC火力で用いられている高クロム鋼の溶接部で発生している損傷事例も踏まえ、ニッケル基材の経年化に伴うクリープ強度評価や寿命診断技術などにも取り組んでもらいたい。

また、 蒸気温度の上昇に伴う高温対策と評価を、ボイラ、タービン、高温弁を中心に行っているが実証に向けて他の部材への影響評価を十分に行うとともに、材料評価にとどまらず、例えばタービンの性能や効率, 信頼性や運用性に関する評価や検証を期待したい。

更に、経済性に優れるとともに長期信頼性を有した材料の開発が必要となる。検証を確実に実施しながら材料開発を行うべきである。

今後の研究開発の方向等に関する提言

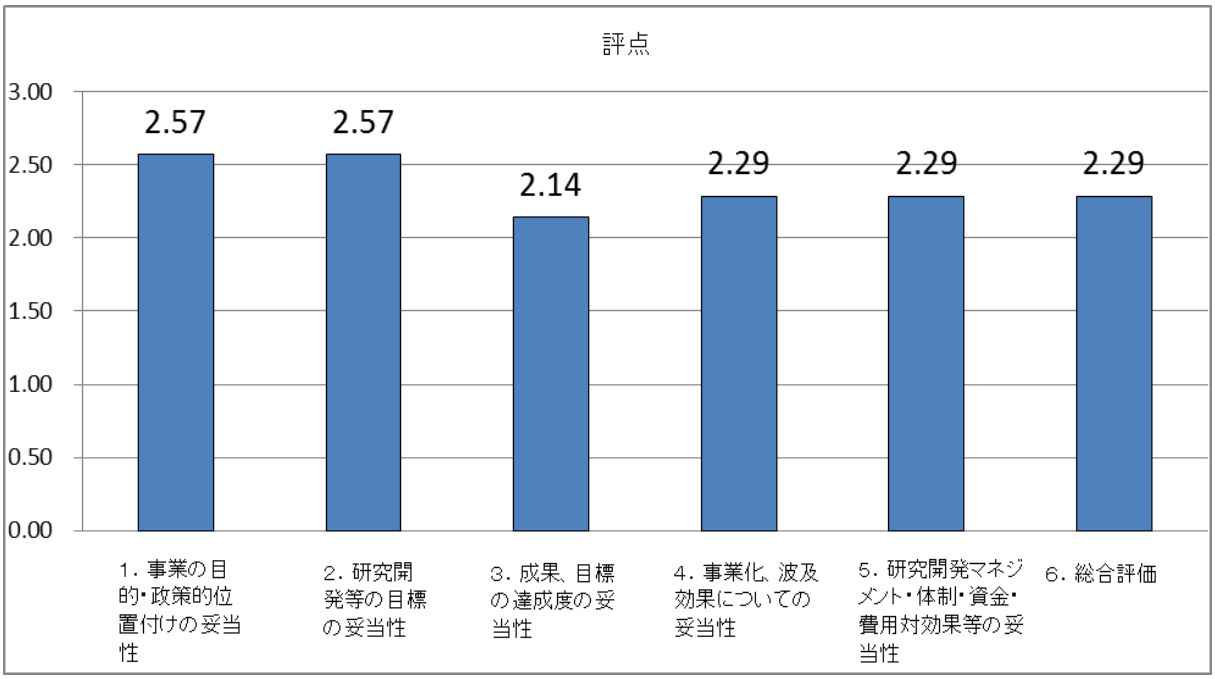
なし

評点結果

評点法による評点結果

（C 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発事業）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.57	2	2	3	3	3	3	2
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.57	2	2	3	3	3	3	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.14	2	2	3	2	2	2	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.29	2	2	3	3	2	2	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ･体制･資金･費用対効果等の妥当性	2.29	2	2	3	3	2	2	2
6. 総合評価	2.29	2	2	3	3	2	2	2



技術に関する事業

技術に関する事業名	Ｄ．次世代型双方向通信出力制御実証事業
上位施策名	再生可能エネルギーの安定供給確保
担当課	資源エネルギー庁　電力基盤整備課

事業の目的・概要

太陽光発電の大量導入に備え、系統状況によって外部からの通信信号に応じて出力をコントロールできる太陽光発電用 PCS（Power Conditioning System:直流交流変換装置）を開発するとともに、通信と組み合わせた実証試験を実施する。

予算額等（補助（補助率：1/2））　（単位：千円）

開始年度	終了年度	事前評価時期	中間評価時期	事業実施主体
平成２３年度	平成２５年度	平成２２年度	平成２５年度	東京大学等
H23FY 予算額	H24FY 予算額	H25FY 予算額	総予算額	総執行額
800,000	459,158	108,000	1,367,158	491,329

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
①通信による出力制御が可能な太陽光PCS（住宅用、事業用）	・通信機能付き太陽光発電用PCSの開発 ・通信信号に応じて出力をコントロールできること	通信による出力制御実証試験を行う機能を検討し、通信装置とのインターフェースの共通仕様を取り纏め、それらを具備する機器開発を実施し、開発機器の動作試験および通信装置との接続試験を実施した。また現在、実環境へPCSを設置しフィールド試験を実施中であり、結果は良好である。事業終了時には全評価が完了する見込みである。	達成

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
②通信による出力制御が可能な蓄電池用PCS	・通信機能付き蓄電池用PCSの開発 ・通信信号に応じて出力をコントロールできること	充・放電電力制御方法や主回路定格などの基本仕様ならびに通信機能仕様を検討し、それらを具備する機器開発を実施し、開発機器の動作試験および通信装置との接続試験を実施しており結果は良好である。今後は、実フィールドにおける試験および評価を実施し、事業終了時には完了する見込みである。	達成

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
③電圧調整機能付きPCS	・シミュレーション等の検討で選定された最適な制御方式を具備したPCSの開発 ・安定的に動作すること	各種シミュレーションを実施した上で、電圧上昇抑制効果やSVR（Step Voltage Regulator: 電圧調整器）タップ動作への影響、SVC（Static Var Compensator: 静止型無効電力補償装置）制御機能への影響、制御の安定性などを評価項目として、定力率制御方式、電圧依存型定力率制御方式を実証器に具備する制御方式として選定するとともに、基本制御仕様を検討・確定した。さらに前者を組み込んだ3kW級PCSおよび後者を組み込んだ50kW級PCSを製作し、工場試験を実施した。今後は、実フィールドにおける試験および評価を実施し、事業終了時には完了する見込みである。	達成

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
④双方向通信機器	・PCSの出力制御を実現する種々の双方向通信機器の開発 ・安定的かつ確実に動作すること	センターサーバ～PCS間の構成、通信手順、電文形式等を議論のうえ取り纏め、PCSの制御を目的とした各種双方向通信において必要となる機器を開発した。また、開発した機器を実証フィールドおよび各社敷地内等において試験を実施した。現在、年間を通じたデータの取得や各種条件下における試験および評価を実施中であり、結果は良好である。事業終了時には全評価が完了する見込みである。	達成

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
⑤サイバーセキュリティ関連機器	・通信ネットワークに内在する脆弱性の検討・セキュリティ技術の開発 ・想定される攻撃からネットワークを保護できること	スマートグリッドシステムのセキュリティに関わる文献調査などにより、セキュリティリスクに対する対策方針について検討を行った。また、開発した侵入検知システムを青森フィールドに導入し、作成した対策方針を参考に、複数の検知方法で評価を実施し、その結果より検知率の向上方策を検討した。今後はシステムの試験を引き続き実施し、事業終了時には評価を完了する見込みである。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし

＜共通指標＞

論文数
6

総合評価概要

5つの要素技術に対して明確な目標を定め，計画に従って着実に成果を挙げており、現在までの経緯は高く評価できる。特に、住宅用、事業用 PCS（Power Conditioning System：直流交流変換装置）に関しては実環境下に設置したフィールド試験を実施中であり、良好な成果が得られている。また、蓄電池用 PCS や電圧調整機能付き PCS の開発に関しても、それぞれ接続試験や工場試験を実施済みであり、実フィールド試験を残すのみとなっている。PCS 出力の制御を行うための種々の双方向通信機器の開発も各種行われており、試験データが蓄積されている。更に、サイバーセキュリティ関連機器の開発に関しては、検知システムのフィールド試験を既に実施している。このように 5 つの要素技術各々に関しての進捗状況はおおむね良好であると評価する。

この技術は、明確な目標と実施計画に基づき、企業、大学及び電力会社が有機的に協力して展開されており、その研究・開発体制も適切であり、今後の発展が期待できる。

更に、本実証事業に留まらず太陽光発電の大量導入に関連する「次世代送配電系統最適制御技術実証」並びに「太陽光発電出力予測技術開発実証」とも密に連携が図れている点も評価できる。

なお、本事業で得られた成果（開発された技術）を社会に適用していくためには、政策が中心となって例えば採用すべき通信方式の決定などを行っていく必要があり、政策当局による、本事業の成果の活用を期待する。また、実際に事業化するか否かについては、国の政策面での後押しが必要。更に、このようなシステムではサイバーセキュリティが重要なので、サーバーを守るだけではなく、システム全体のセキュリティを考えるべき。

今後の研究開発の方向等に関する提言

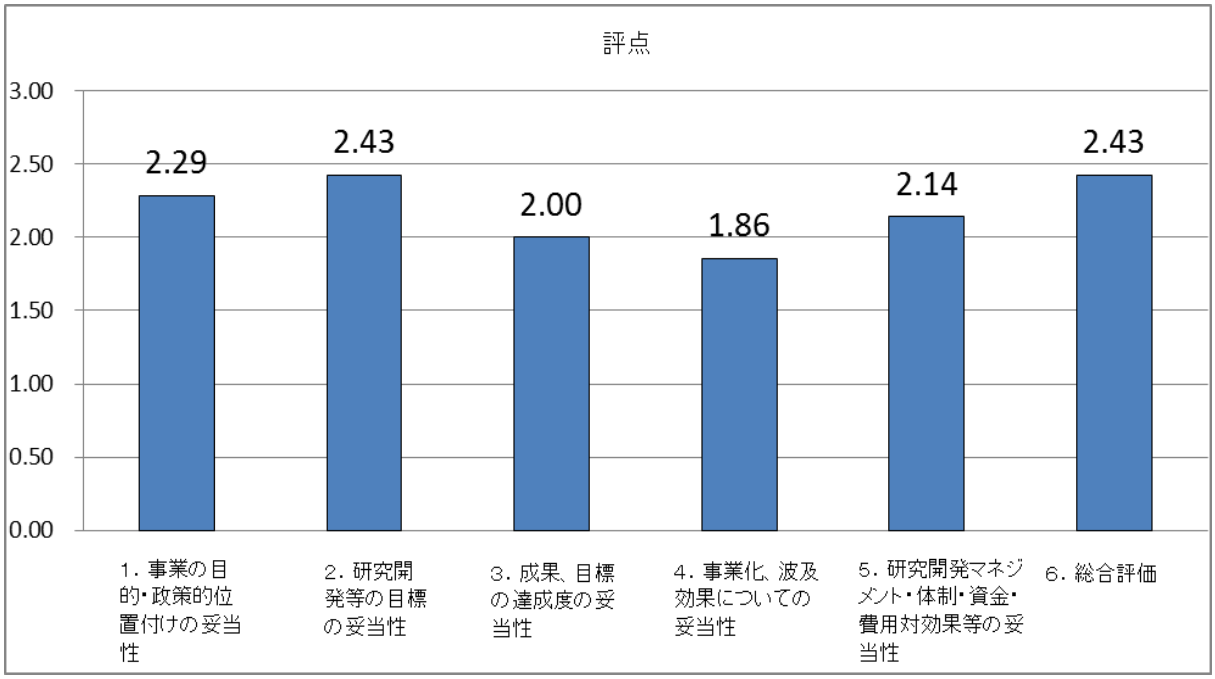
産官学の様々な実施者によるオープンイノベーションの促進、公的資金による研究の成果は公共財であるとの認識による成果・データに対するオープンアクセスの提供などの実現を期待する。

評点結果

評点法による評点結果

（D 次世代型双方向通信出力制御実証事業）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.29	3	2	2	3	2	3	1
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.43	3	1	3	3	2	3	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.00	3	1	3	2	2	2	1
4. 事業化、波及効果についての妥当性	1.86	2	2	2	3	1	2	1
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.14	2	1	3	3	2	3	1
6. 総合評価	2.43	3	2	3	3	2	3	1



技術に関する事業

技術に関する事業名	E. 太陽光発電出力予測技術開発実証事業
上位施策名	再生可能エネルギーの安定供給確保
担当課	資源エネルギー庁　電力基盤整備課

事業の目的・概要

太陽光発電大量導入時に必須となる、太陽光発電の出力状況把握や出力予測のための技術開発を行う。

予算額等（補助（補助率：1/2））　（単位：千円）

開始年度	終了年度	事前評価時期	中間評価時期	事業実施主体
平成２３年度	平成２５年度	平成２２年度	平成２５年度	東京大学等
H23FY 予算額	H24FY 予算額	H25FY 予算額	総予算額	総執行額
100,000	90,000	33,000	223,000	137,765

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

要素技術	目標･指標	成　果	達成度
日射量観測データや気象衛星データからの日射量推定（課題⑧－１）	統合日射量データベースを構築する。	気象衛星画像から日射量を推定する手法を、需給運用上のニーズに合うよう改良した。 衛星推定日射量に日射計観測値を用いた誤差補正を行うことで精度向上を図った。	達成
空間線形回帰法（クリギング）に基づく空間補間による日射量推定（課題⑧－２）	リアルタイムの日射量マップの作成を目指し、地球統計学の空間線形回帰法（クリギング）に基づく日射の空間補間法を地域PV発電出力把握に適した手法に改良する。	これまでの10km四方程度を推定する空間補間法を、電力系統の需給エリアで適用できるよう、面的広がりの大きさの違いによる変動平滑化効果を考慮して改良した。 日射量の空間補間法を元に、気温に関する空間補間を行う技術を開発した。	達成
気象衛星データを用いた日射量推定（課題⑧－３）	水平スケール別・天気パターン別に作成した日射量の評価指標値より、水平スケール別・天気パターン別の日射量推定手法の適用範囲を明確にする。	面的な日射特性の把握に必要な評価指標を選定し、天気区分別やエリアの広さ別等各状態における最大変化幅等を見積もることを可能とした。 衛星画像から推定した面的な日射量（東京大学竹中特任研究員作成）に対し観測値で補正し推定精度を向上する手法を構築した。	達成

要素技術	目標･指標	成　果	達成度
時間スケールに応じた日射量予測 （課題⑧－４）	日本気象協会保有の数値予報モデル（SYNFOS-3D）や統合日射量データベースなどを用いて日射量予測手法を開発する。	数時間先の予測は気象モデルではなく移動予測手法を用いるなど、予測する時間スケールにより予測手法を変えた。 翌日予測では、気象モデルに統計的手法を組み合わせて、精度の向上を図った。	達成
気象モデルによる日射量の予測 （課題⑧－５）	電力中央研究所保有の気象予測・解析システム（NuWFAS）をベースとして、当日・翌日の気温・風速・日射量を予測する。	既開発の気象予測・解析システムを、翌日・当日の日射量を予測するシステムに改良し、予測を行った。	達成
気象予測モデルおよび統計手法を用いた日射量の予測 （課題⑧－６）	数値予報データを利用した統計学的手法により日射量を予測するモデルを構築する。	気象庁数値予報データ（GPV）の雲量を入力データとし、統計解析により日射量予測値を出力するモデルを作成した。	達成

要素技術	目標･指標	成　果	達成度
地域の太陽光発電導入状況に対応した太陽光発電出力推定（課題⑧－７）	地域PV導入状況の違いを考慮可能な推定法を検証し、実運用時に地域毎に予め調査が必要なPV設置状況の要素を整理する。	地域のPV導入状況に対応したPV出力推定を可能とする個別PVの発電出力推定手法の精度評価を行い、出力推定に影響を与える要素（パネルの方位、角度など）を整理した。	達成
統計手法を用いた太陽光発電出力推定（課題⑧－８）	日射量推定・予測値を元に、過去の実測データによる学習および補正などを適用しPV出力を推定する手法を開発する。	需給計画・運用のニーズに基づきPV出力を推定する時間・空間解像度を決定した。 PV出力に大きな影響を与える日影および積雪について、推定精度向上のための評価を行った。	達成
日射量推定結果からの太陽光発電出力推定（課題⑧－９）	太陽光パネル設置地点の位置、パネルの方位・角度・温度、さらにはパネルの種類やPCSの変換効率ほか様々な要因が、日射量から太陽光発電出力への推定に与える影響を整理する。	PVパネル設置方向と傾きを推定する手法を検討し、ほぼ正しく推定できる見込みが得られた。 PVの出力推定および出力予測アルゴリズムの開発のための誤差要因を分析し、観測地点毎と、複数の観測地点があるエリアのPV出力推定モデルに適用し、精度を確認した。	達成
各種統計モデルと配電線潮流を用いた配電-全体系統の太陽光発電出力推定（課題⑧－１０）	配電線レベルの広さのPV出力の推定を行う手法を開発する。	PV出力と日射量・気温、需要の関係をモデル化するために計測データの分析を行い、相関を求めた。 配電（地域）レベルのPV出力推定機能の開発を行い、需要モデルを利用することで、精度が上がることを確認した。	達成
統計処理による太陽光発電量推定（課題⑧－１１）	簡易的な手法により、地域の日射強度から発電電力量を推定する手法を開発する。	簡易な統計手法を用いた発電量推定モデルを構築した。	達成

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
日射量データ分析（課題⑧－１２）	太陽光発電の大量普及時に、太陽光発電電力量の予測や出力を推定する技術の観点から、用途・目的に応じて日射量や太陽光発電の発電量データがどの程度の空間密度、計測サンプリングで必要であるかを考察する。	PV300で設置した日射計のデータを様々な角度から分析し、太陽光発電の大量普及時に太陽光発電電力量の予測や出力を推定する技術の観点から、電力システムの運用という用途・目的に応じて日射量や太陽光発電の発電量データがどの程度の空間密度、計測サンプリングで必要であるかを考察するための基礎分析を行った。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし

＜共通指標＞

論文数
18

総合評価概要

将来的な再生可能エネルギーの有効利用に備えて、太陽光発電に不可欠な出力予測技術の開発は重要であり、本技術の必要性や有効性は高く評価できる。また、大学や企業に加えて電力 10 社が参加する実施体制も十分であると考える。

太陽光発電の出力の予想精度が向上すると、太陽光発電の供給力への参入がより正確にできるようになり、系統容量に対する太陽光発電の導入可能量の拡大、系統全体の効率化などの成果が期待できることから、国策として推進されている再生可能エネルギーの導入拡大策の一環として、国が取り組むべき

技術開発分野と考えられる。

なお、本技術の最終目標である発電出力の予測は、日射量などの気象データから推定されるもので、長期間にわたる高精度な観察が不可欠であり、3 年間という短時間に信頼できる日射量データベースの構築が可能であるのかが疑問である。今後 3 年間の継続調査に期待したい。また、気象モデルから日射量を推定する技術に関しても、特に新規性は認められない。実施者間の連携が有効に機能しているのか疑問が残る。

当該研究は先行研究が多数存在することが考えられ、それらの成果がどのように利用されているのか、あるいはこれからどのように利用しようしているのかも不明である。基礎研究が多く、事業化に向けての道のりはまだ相当長いと考えられる。

今後の研究開発の方向等に関する提言

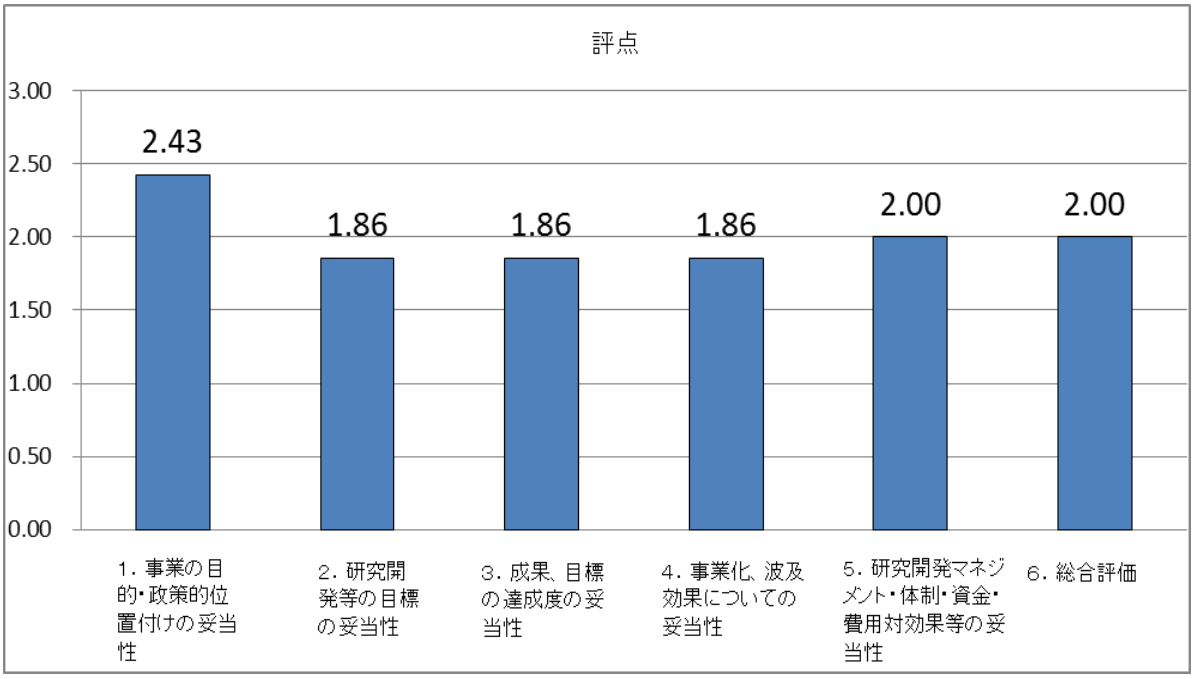
産官学の様々な実施者によるオープンイノベーションの促進、公的資金による研究の成果は公共財であるとの認識による成果・データに対するオープンアクセスの提供などの実現を期待する。

評点結果

評点法による評点結果

（E 太陽光発電出力予測技術開発実証事業）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.43	3	2	3	2	2	3	2
2. 研究開発等の目標の妥当性	1.86	2	1	2	2	2	3	1
3. 成果、目標の達成度の妥当性	1.86	2	1	2	2	2	2	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	1.86	2	2	2	3	1	2	1
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.00	2	2	3	2	1	3	1
6. 総合評価	2.00	2	2	2	2	2	3	1



第１章　評価の実施方法

第１章　評価の実施方法

本プロジェクト評価は、「経済産業省技術評価指針」（平成２１年３月３１日改定、以下「評価指針」という。）及び第２５回産業構造審議会産業技術部会評価小委員会（平成２１年１月２８日）において審議・了承された「技術に関する施策の評価」に基づき、実施した。

１．評価目的

以下の（１）～（４）を目的として評価を実施した。

(1) より良い政策・施策への反映

評価を適切かつ公正に行うことにより、研究者の創造性が十分に発揮されるような、柔軟かつ競争的で開かれた研究開発環境の創出など、より良い政策・施策の形成等につなげること。

(2) より効率的・効果的な研究開発の実施

評価を支援的に行うことにより、研究開発の前進や質の向上、独創的で有望な優れた研究開発や研究者の発掘、研究者の意欲の向上など、研究開発を効果的・効率的に推進すること。

(3) 国民への技術に関する施策・事業の開示

高度かつ専門的な内容を含む技術に関する施策・事業の意義や内容について、一般国民にわかりやすく開示すること。

(4) 資源の重点的・効率的配分への反映

評価の結果を技術に関する施策・事業の継続、拡大・縮小・中止など資源の配分へ反映させることにより資源の重点化及び効率化を促進すること。また、研究開発をその評価の結果に基づく適切な資源配分等通じて次の段階に連続してつなげることなどにより、研究開発成果の国民・社会への還元の効率化・迅速化に資すること。

また、評価の実施に当たっては、以下の①～④を基本理念として実施した。

① 透明性の確保

推進課、主管課及び研究開発機関においては、積極的に成果を公開し、その内容について広く有識者等の意見を聴くこと。評価事務局においては、透明で公正な評価システムの形成、定着を図るため、評価手続、評価項目・評価基準を含めた評価システム全般についてあらかじめ明確に定め、これを公開することにより、評価システム自体を誰にも分かるものとするとともに、評

価結果のみならず評価の過程についても可能な限り公開すること。

② 中立性の確保

評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部評価の導入等により、中立性の確保に努めること。

③ 継続性の確保

技術に関する施策・事業においては、個々の評価がそれ自体意義を持つだけではなく、評価とそれを反映した技術に関する施策・事業の推進というプロセスを繰り返していく時系列のつながりにも意義がある。したがって、推進課及び主管課にとって評価結果を後の技術に関する施策・事業の企画立案等に反映させる際に有用な知見を抽出し、継続性のある評価方法で評価を行うこと。

④ 実効性の確保

政策目的に照らし、効果的な技術に関する施策・事業が行われているか判断するための効率的評価が行われるよう、明確で実効性のある評価システムを確立・維持するとともに、技術に関する施策・事業の運営に支障が生じたり、評価者及び被評価者双方に過重な負担をかけることのない費用対効果の高い評価を行うこと。

２．評価者

評価を実施するにあたり、評価指針に定められた「評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部評価者の導入等により、中立性の確保に努めること」との規定に基づき、外部の有識者・専門家で構成する検討会を設置し、評価を行うこととした。

これに基づき、評価検討会を設置し、技術に関する施策、技術に関する事業（プロジェクト等）の目的や研究内容に即した専門家や経済・社会ニーズについて指摘できる有識者等から評価検討会委員名簿にある７名が選任された。

なお、本評価検討会の事務局については、指針に基づき経済産業省資源エネルギー庁電力基盤整備課が担当した。

３．評価対象

技術に関する施策「次世代電力供給システム」

技術に関する事業

A. 高効率ガスタービン実用化技術開発事業

A1. 1700℃級ガスタービン実用化技術開発事業
【実施期間：平成20年度～平成23年度　事後評価】

A2. 高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発事業
【実施期間：平成20年度～平成23年度　事後評価】

B. 高効率ガスタービン技術実証事業
　B1. 1700℃級ガスタービン技術実証事業
　　【実施期間：平成24年度～平成32年度　中間評価】
　B2. 高湿分空気利用ガスタービン技術実証事業
　　【実施期間：平成24年度～平成32年度　中間評価】
C. 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発事業
　　【実施期間：平成20年度～平成28年度　中間評価】
D. イットリウム系超電導電力機器技術開発事業
　　【実施期間：平成20年度～平成24年度　事後評価（※事業評価はNEDO実施のため施策に係る評価のみ】
E. 次世代型双方向通信出力制御実証事業【実施期間:平成23年度～平成25年度　中間評価】
F. 太陽光発電出力予測技術開発実証事業【実施期間:平成23年度～平成25年度　中間評価】

を評価対象として、各研究開発実施者から提出された資料をもとに、技術に関する事業（プロジェクト）の評価を行うとともに、それらの事業評価の結果を踏まえて、各事業を俯瞰する形で各事業の相互関係等に着目し、技術に関する施策の評価を実施した。

４．評価方法

第１回評価検討会においては、各担当者より施策及び事業について説明を行い、質疑応答等、委員による検討が行われた。

第２回評価検討会においては、第１回評価検討会を踏まえて委員の評価コメントを元に、評価報告書案を作成し、同報告書案の審議が行われた。

また、委員の自由な意見交換を確保する観点から、評価検討会を非公開として実施した。

５．評価項目

【技術に関する施策】

〇施策の目的・政策的位置付けの妥当性
- ・施策の目的の妥当性
- ・施策の政策的位置付けの妥当性
- ・国の施策としての妥当性、国の関与が必要とされる施策か。

〇施策の構造及び目的実現見通しの妥当性
- ・現時点において得られた成果は妥当性
- ・施策の目的を実現するために技術に関する事業が適切に配置されているか。

〇総合評価

【技術に関する事業】

〇事業の目的・政策的位置付けの妥当性

・事業の目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。

・国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。

〇研究開発等の目標の妥当性

・研究開発等の目標は適切かつ妥当か。

〇成果、目標の達成度の妥当性

・成果は妥当か。

・目標の達成度は妥当か。

〇事業化、波及効果についての妥当性

・事業化については妥当か。

・波及効果は妥当か。

〇研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

・研究開発計画は適切かつ妥当か。

・研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。

・資金配分は妥当か。

・費用対効果は妥当か。

・変化への対応は妥当か。

〇総合評価

第２章　技術に関する施策の概要
「次世代電力供給システム」の概要

第２章　技術に関する施策
「次世代電力供給システム」の概要

１．施策の目的・政策的位置付け
１－１　施策の目的

昨今、気候変動問題への対応が地球規模の課題となっている中、化石エネルギーの利用に伴う温室効果ガスの排出抑制に関する関心が高まっている。

特に我が国では、東日本大震災以降、原子力発電所の定期検査入りに伴い、国内電源構成に占める火力発電の割合は、約９割まで上昇しており、2030年以降も火力発電は我が国の電源構成の中で重要な位置づけを占める予定である。

石炭は他の化石燃料と比べ、可採年数が約143年と長く、世界各国に幅広く分布する等、供給安定性が高く、経済性に優れることから、我が国にとって、今後とも石油代替エネルギーの重要な柱の一つとなる。また、天然ガスは化石燃料の中で、安定的かつクリーンなエネルギーであり、環境規制の厳しい都市圏での大気汚染防止対策上、極めて有効な発電用燃料として導入されている。

しかし、発電時に発生する単位当たり二酸化炭素排出量は他の電源に比べて大きく、地球環境問題での制約要因が多いという課題を抱えている。

また、我が国は世界最大の石炭および天然ガス輸入国であり、資源のほぼ100%を海外に依存している。よって、エネルギーの有効利用と環境負荷の低減に努めるため、我が国は長年にわたり化石エネルギーの利用技術の効率化に積極的に取り組むとともに、環境に適した世界最高水準の火力発電技術の開発・利用を実現してきたところである。

一方、温室効果ガスの排出抑制・エネルギー自給率向上、エネルギー源多様化、環境関連産業育成等の観点から、我が国は太陽光発電等の再生可能エネルギーの導入を進めているが、電力系統上の課題として、①余剰電力の発生や、②出力変動に伴う周波数変動調整力の不足、③配電系統における電圧上昇　等が指摘されているところである。よって、再生可能エネルギーの導入拡大に伴う電力系統上の課題への対策を進めなければ、我が国の電力の安定供給を阻害するおそれがある。

したがって、今後、再生可能エネルギーが導入拡大されることで電源が多様化する電力を効率かつ安定的に供給するため、送配電系統や発電運用技術の高度化を行い、送電効率の向上、余剰電力対策等の系統安定化対策を行うことで、環境対策および電力の安定供給を可能とする強靭な電力供給システムを確立していく必要がある。

将来に向けた世界的な気候変動問題の制約下で、環境負荷を低減させることを目的とした電力の安定供給にかかる技術開発は、我が国の環境及びエネルギー政策上極めて重要な施策である。

1-2 政策的位置付け

1-2-1 火力発電技術開発

当技術開発は、化石エネルギー利用の高度化として、環境に配慮したクリーン燃焼技術による高効率化を目指す。

2013年６月に閣議決定された「日本再興戦略」では、東日本大震災以降、老朽火力の焚き増し等により、火力発電の燃料コスト大幅に増加していることが指摘されており、この課題に対する当面の主要施策として、以下の内容が記載されている。

◇高効率火力発電を徹底活用し、エネルギーコストを低減させる。

◇先進技術開発を加速し、世界最高水準の効率を有する火力発電を我が国で率先して導入するとともに、世界へ積極的に展開する。

〇火力発電の技術開発支援

・先進超々臨界圧火力発電（A-USC）について、2020 年代の実用化を目指す（発電効率：現状 39%程度→改善後 46%程度）。

・LNG 火力について、2020 年頃までに 1700 度級ガスタービンの実用化を目指す（発電効率：現状 52%程度→改善後 57%程度）。

また、2013 年９月に総合科学技術会議で決定された「環境エネルギー技術革計画」では、短中期（2030 年頃まで）に生産・供給分野で実用化が見込まれる技術として、「高効率石炭火力発電」、「高効率天然ガス発電」が挙げられており、日本のみならず、全世界においてエネルギーの安定供給と経済成長を図りつつ、低炭素化を実現するため、高効率火力発電技術の更なる高度化と再生エネルギーの低コスト化を行い、世界的な普及を図るとしている。

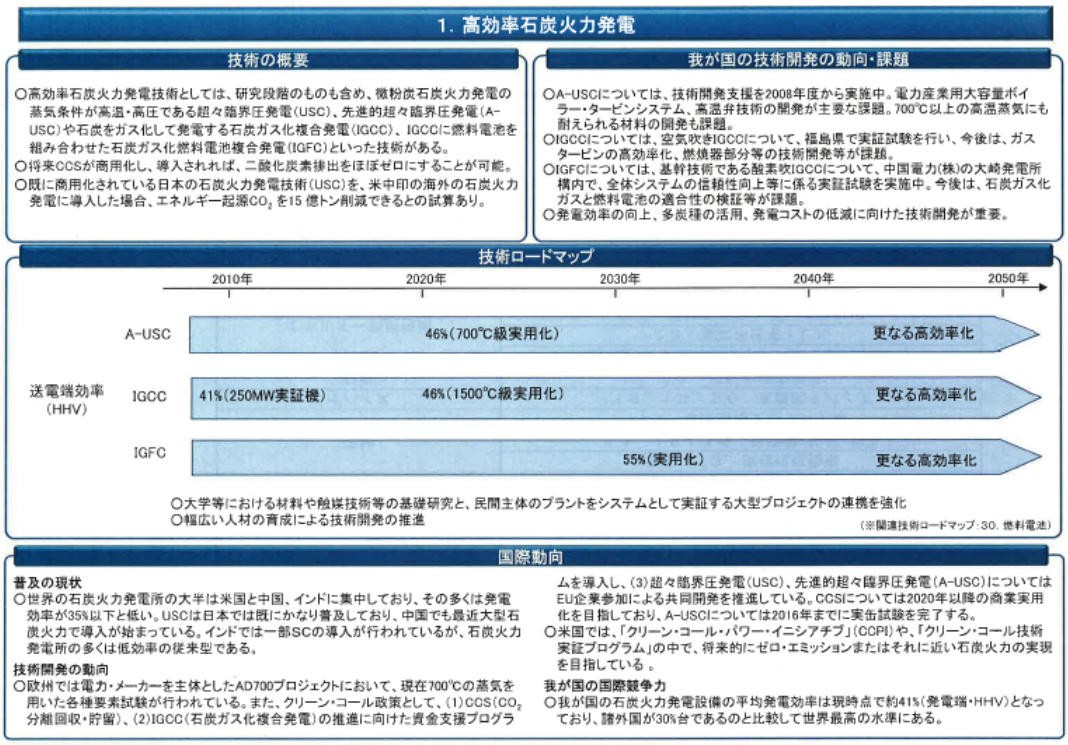


図 1-1.「環境エネルギー技術革計画」における「高効率石炭火力発電」技術ロードマップ

出典：総合科学技術会議「環境エネルギー技術革新計画」（平成 25 年９月）

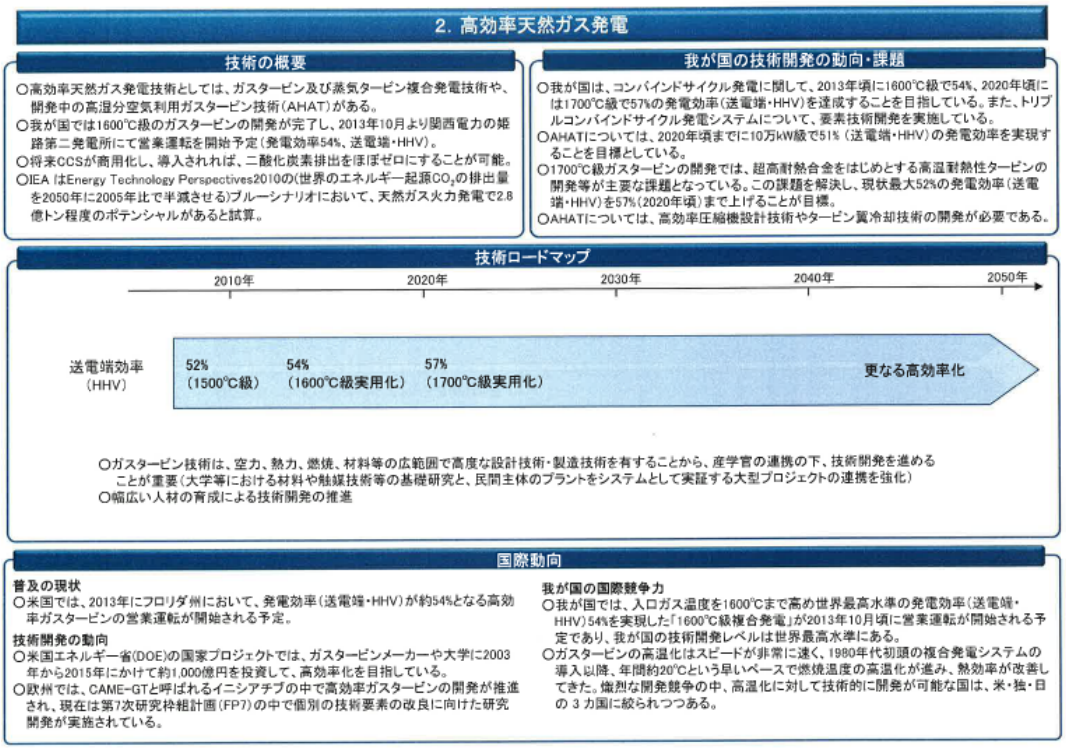


図 1-2.「環境エネルギー技術革計画」における「高効率天然ガス火力発電」技術ロードマップ
出典：総合科学技術会議「環境エネルギー技術革新計画」（平成 25 年９月）

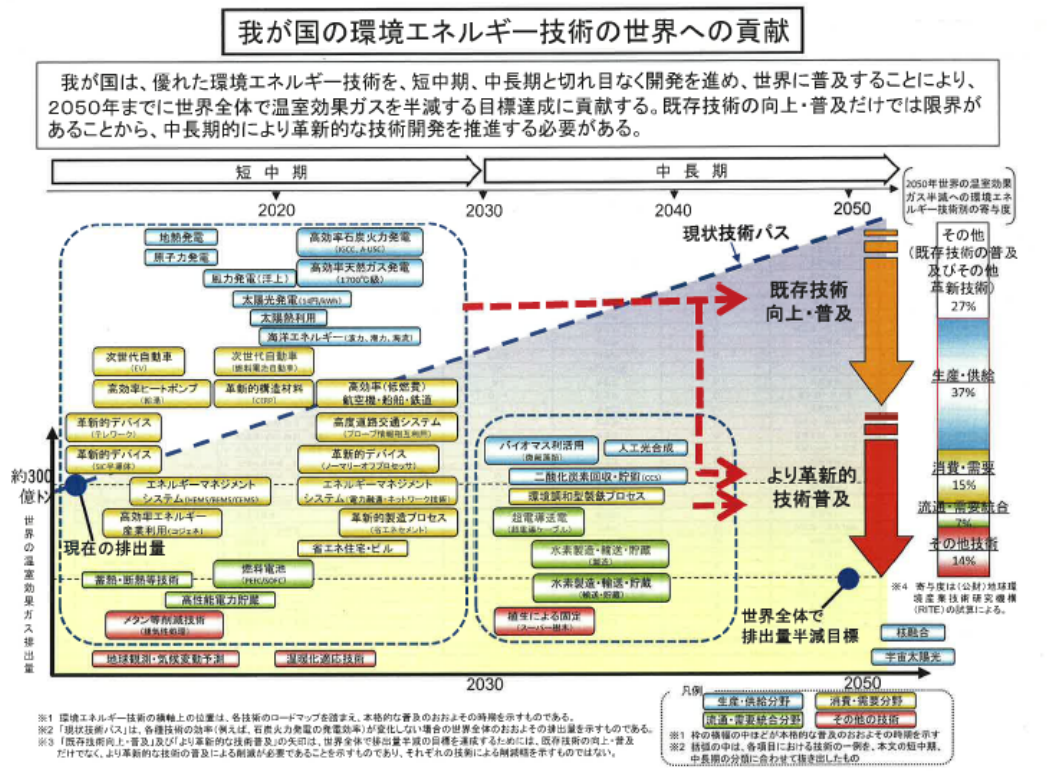


図 1-3.「環境エネルギー技術革計画」における「我が国の環境エネルギー技術の世界への貢献」
出典：総合科学技術会議「環境エネルギー技術革新計画」（平成 25 年９月）

1-2-1 送配電技術開発

2013年６月に閣議決定された「日本再興戦略」では、エネルギーを効率的に流通させるため、広域系統運用、無駄を徹底除外するデバイス・部素材や蓄電池の普及により、時間・場所の制限を超えた効率的なエネルギー流通を達成し、日本全体で最適なエネルギー利用が可能となる社会を目指すとしている。この課題に対する当面の主要施策として、以下の内容が記載されている。

◇次世代デバイス・部素材の開発宇を進め、生産から流通、消費の至るところに組み込んで製品・システムを高効率化することにより、エネルギーを効率的に利用する。

〇次世代デバイス・部素材（パワーエレクトロニクス等）研究開発・事業化

・パワーエレクトロニクスや超低消費電力デバイス、光通信技術、超軽量・高強度の構造材料等の研究開発及び事業化を推進し、新市場を創出する。

また、2013 年９月に総合科学技術会議で決定された「環境エネルギー技術革計画」では、短中期（2030 年頃まで）に流通・需給統合分野で実用化が見込まれる技術として、「高性能電力貯蔵」等が挙げられており、従来のエネルギー需要家において、エネルギーの変換や貯蔵が可能となる中、供給・流通・需要全体で最も効率的となるシステ

ムの形成を目指し、必要な個々の技術を開発することとしている。

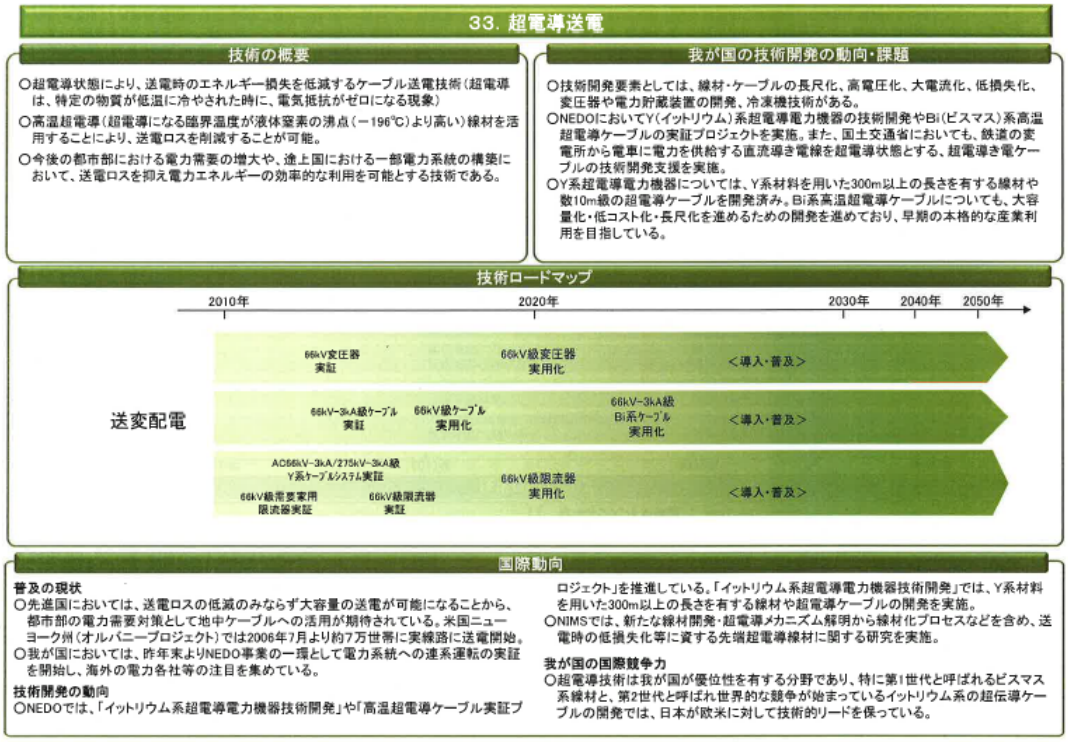


図 1-4.「環境エネルギー技術革計画」における「超電導送電」技術ロードマップ
出典：総合科学技術会議「環境エネルギー技術革新計画」（平成 25 年９月）

１－３　国の関与の必要性

環境負荷を低減に取り組む上で、石炭火力発電の高効率化や次世代型送配電ネットワーク構築等の革新的な技術開発は、研究開発成果の商業性や投資回収可能性に係るリスクが大きく、また、海外でも開発研究が行われていない技術もあるため、民間企業のみでは対応できない世界最先端の研究開発分野である。そのため、民間企業の技術開発意欲を削がないようにするため、国による適切な支援が必要不可欠である。

また、エネルギー・環境分野での革新的技術開発は、新しい技術が社会・経済システムに定着し、具体的なエネルギー供給や環境適合性を発揮して、初めて効用を発揮するものである。そのため、当該技術開発の実施に当たっては、社会・経済システムの中で具体的に技術を担う民間企業の意欲や技術力を十分活用しつつ、技術の市場化に至るまでの経済的社会的リスクを十分踏まえた適切な国の支援が必要である。

２．施策の構造及び目的実現の見通し

２－１　得られた成果

各項目について、順調に成果が出ており、各技術開発について詳細を以下に示す。

（１）高効率ガスタービン実用化技術開発・実証事業

①実用化技術開発事業

〇研究開発期間：2008～2011年度（4ヵ年計画）

〇予算総額：約70億円

②技術実証事業

〇研究開発期間：2012～2020年度（9ヵ年計画）

〇予算総額（予定）：約527億円

【アウトプット】

・エネルギーセキュリティの確保及び地球環境問題の双方に対応するため、2011年度までに各発電技術とも目標の発電効率（高効率ガスタービン技術：56%、高湿分空気利用ガスタービン技術（AHAT）：51%）を達成できる実用化技術を確立する。

【アウトプットからアウトカムへの展開】

①1700℃級ガスタービン実用化技術開発事業

1700℃級ガスタービンの実用化に必要な先端要素技術を適用した各要素モジュールの検証等を実施し、大容量機（25万ｋW程度（コンバインド出力40万ｋW））の高効率化（発電効率56%以上）を実現する。

②AHAT実用化技術開発事業

AHATの実用化に必要な多缶燃焼器等の開発を行うとともにシステムの信頼性等の検証を行い、中小容量機（10万ｋW程度）の高効率化（発電効率51%以上）を実現する。

【アウトカム】

・各発電形式による高効率発電システムを2020年頃までに実用化を目指す。

（２）先進超々臨界圧火力発電（A-USC）実用化要素技術開発事業

〇研究開発期間：2008～2016年度（9ヵ年計画）

〇予算総額（予定）：約86億円

【アウトプット】

・蒸気温度700℃以上、蒸気圧力24.1MPa以上の蒸気条件に耐えられる電力産業用大容量

ボイラー・タービンシステムの開発のため、耐熱耐圧材料の開発や、システム設計、実缶・回転試験等を行うことによりA-USCの技術を確立する。

【アウトプットからアウトカムへの展開】
・要素技術を元にA-USC技術の実証実験を行い、実用化を目指す。

【アウトカム】
・蒸気温度700℃級（発電効率46%HHV）の従来型より高い送電端効率を持つA-USC技術の商用化を2020年代に実現。

（３）イットリウム系超電導電力機器技術開発事業

〇研究開発期間：2008～2012 年度（5 ヵ年計画）
〇予算総額（予定）：約 140 億円

【アウトプット】
イットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器（超電導電力貯蔵：SMES、超電導電力ケーブル、超電導変圧器）の実用化を見通すコイル化、大電流低交流損失化、高電圧電気絶縁技術、限流機能付加技術、システム化技術等重要な技術の開発を行う。

【アウトプットからアウトカムへの展開】
イットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器の評価試験モデルを作製し、繰り返し充放電、送電ケーブル損失低減、変圧器の低損失化及び限流機能付加等の性能検証を行う。また、各機器の普及導入時に必要となる高機能・高性能超電導線材の開発を行う。尚、一部、磁場中高特性線材の開発は米国ロスアラモス国立研究所との共同研究で行う。

【アウトカム】
コンパクトで大容量かつ安定的な電力供給及び送電ロスの飛躍的低減による CO2 削減が期待できるイットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器（超電導電力貯蔵装置：SMES、超電導電力ケーブル、超電導変圧器）の研究開発を行う。

（４）次世代型双方向通信出力制御実証事業

〇研究開発期間：2011～2013年度（3ヵ年計画）
〇予算総額：約13.7億円

【アウトプット】
・通信手段によりきめ細かな出力抑制機能が可能な直交変換装置（ＰＣＳ）の開発や、太陽光発電や蓄電池システム等の効率的な制御を行うための各種双方向通信の実証を行う。

【アウトプットからアウトカムへの展開】

・太陽光発電等の大量導入に伴う系統安定化対策（余剰電力対策等）として、各種通信手段による出力抑制機能付きＰＣＳの市場投入、普及を目指す。

【アウトカム】

・太陽光発電等の大量導入時には電力需要の少ない時期に出力抑制を行うことを前提に、出力抑制量を最小化し、太陽光発電等の大量導入に伴う系統安定化対策コストを抑制しつつ、太陽光発電等の大量導入と電力系統の安定化を実現する。

（５）太陽光発電出力予測技術開発実証事業

〇研究開発期間：2011～2013年度（3ヵ年計画）

〇予算総額：約2.2億円

【アウトプット】

・既存の太陽光発電の出力データ等や気象情報等を活用し、現在では確立されていない太陽光発電の出力状況把握や出力予測手法の開発を行う。

【アウトプットからアウトカムへの展開】

・太陽光発電の出力予測に基づき、電力系統の需給運用に活用可能かどうか評価を行う。

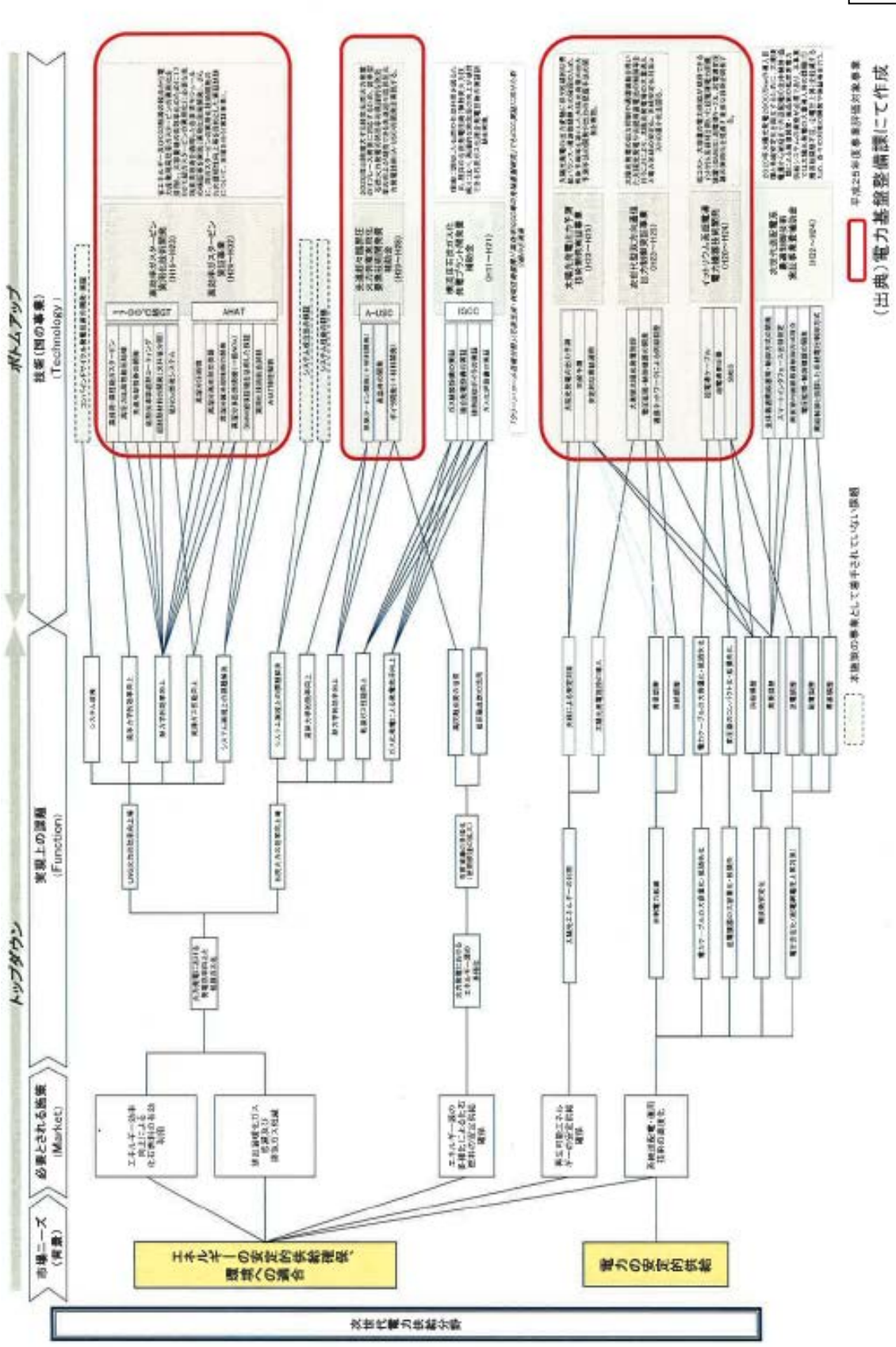
【アウトカム】

・気象情報に基づく正確な太陽光発電の出力予測技術の確立により、周波数調整、需給調整、再生可能エネルギー電源の有効利用への活用や待機電源の最小化などにつなげていく。

２－２　施策の構造

各事業の技術体系を整理したロジックツリーを別紙１に示す。また、各事業の目的や進捗を整理するとともに、中長期的なアウトカムを整理したロジックモデルを別紙２に示す。

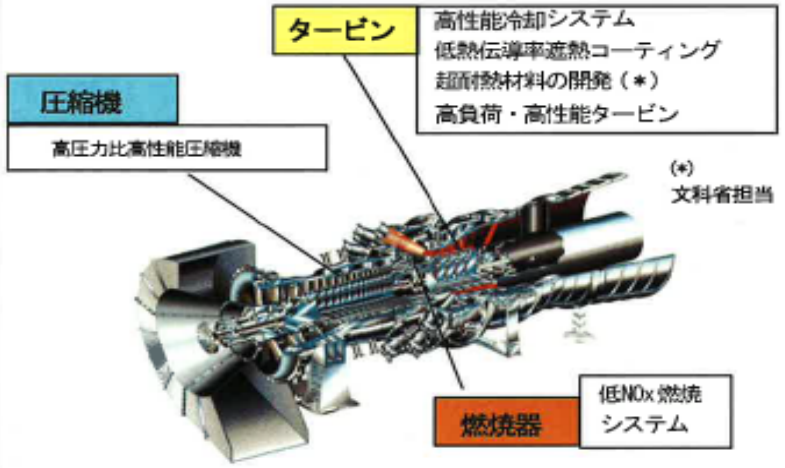
別紙１


ボトムアップ
トップダウン
技術（個の事業）
(Technology)
実現上の課題
(Function)
必要とされる価値
(Market)
市場ニーズ
（背景）
（出典）電力基盤整備課にて作成

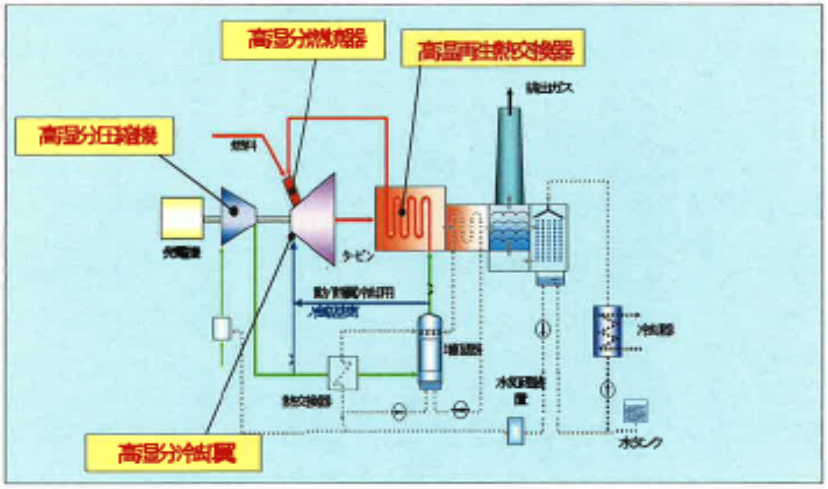
高効率ガスタービン実用化技術開発・実証事業

プロジェクト概要	プロジェクトのアウトプット	カスタマー	プロジェクトのアウトカム
省エネルギーおよび二酸化炭素削減の観点から電力産業用高効率ガスタービンの実用化を目指す	従来型発電より高効率を達成できる実用化技術を確立	民間企業（電力会社、重エメーカーおよびエンジニアリング会社）	各発電形式による高効率発電システムを2020年頃に実用化を実現する。

○1700℃級ガスタービン（送電端効率57%（HHV））



○高湿分空気利用ガスタービン
（AHAT：Advanced Humid Air Turbine、送電端効率：51%（HHV））



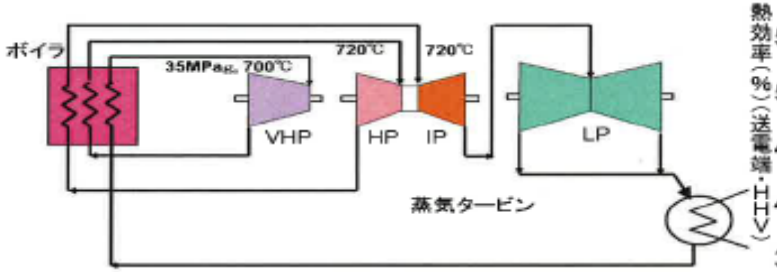
別紙２

先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発

プロジェクト概要	プロジェクトのアウトプット	カスタマー	プロジェクトのアウトカム
CO2削減要求に対して、信頼性と経済性を両立し発電効率に優れたA－USCの開発	蒸気温度700℃級電力産業用大容量ボイラー・タービンシステムを伴うA-USCの技術を確立する。	民間企業（電力会社、重工メーカーおよびエンジニアリング会社）	蒸気温度700℃級（発電効率46%HHV）の従来型より高い熱効率を持つA-USC技術の商用化を2020年度までに実現。

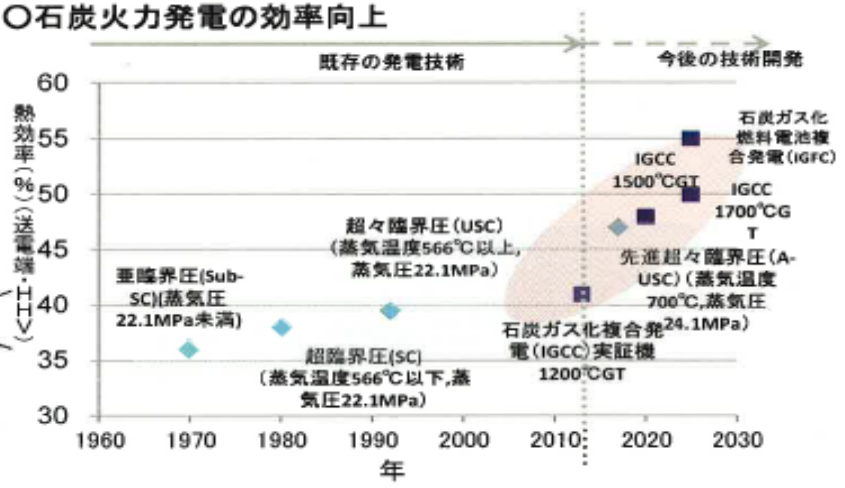
○Ａ－ＵＳＣ設備概要図

（A-USC：Advanced-Ultra Super Critical、送電端効率46%（HHV））



※VHP：超高圧（Very High Pressure）
HP：高圧（High Pressure）
IP：中圧（Intermediate Pressure）
LP：低圧（Low Pressure）

○石炭火力発電の効率向上



※送電端：発電所構内の所内消費電力を差し引いた電力
HHV：高位発熱量基準（Higher Heating Value）

イットリウム系超電導電力機器技術開発

プロジェクト概要

系統安定化や送電ロスの飛躍的低減によるCO2削減を可能（2020年に20万t-CO2/年）とするため、
①超電導電力貯蔵装置（SMES）
②超電導ケーブル
③超電導変圧器
の研究開発

プロジェクトのアウトプット

イットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器の実用化を見通すコイル化、大電流低交流損失化、高電圧電気絶縁技術、限流機能付加技術、システム化技術等重要な技術の開発

カスタマー

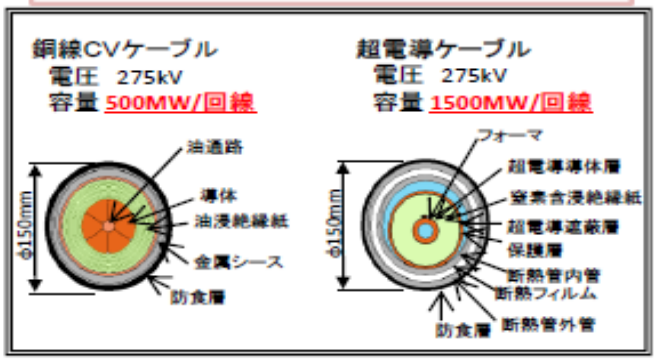
民間企業
（電力会社、重工メーカーおよびエンジニアリング会社）

プロジェクトのアウトカム

コンパクトで大容量かつ安定的な電力供給及び送電ロスの飛躍的低減によるCO2削減が期待できるイットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器の研究開発

事業イメージ

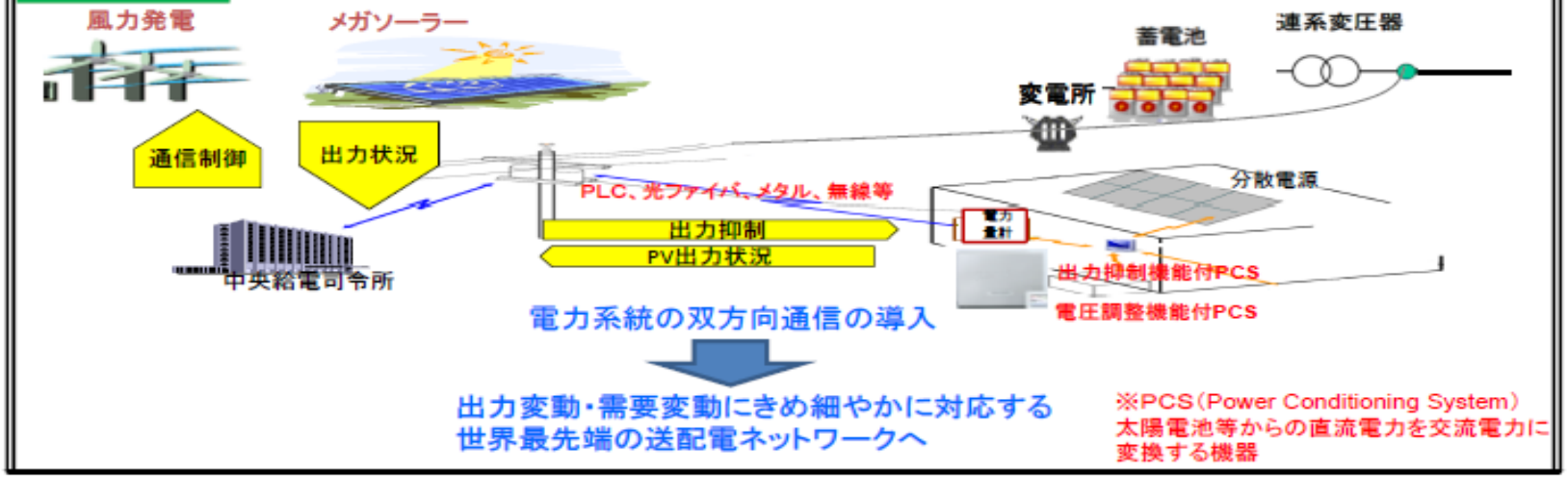
ケーブルの比較



次世代型双方向通信出力制御実証事業

プロジェクト概要	プロジェクトのアウトプット	カスタマー	プロジェクトのアウトカム
太陽光発電の機械損失を最小限に抑えるため、出力調整を通信機能を用いて行い、電力系統の双方向通信技術による実証を行う	通信手段によりきめ細かな出力抑制機能が可能な直交変換装置（PCS）の開発や、太陽光発電や蓄電池システム等の効率的な制御を行うための各種双方向通信を実証。	民間企業 （電力会社、重エメーカーおよびエンジニアリング会社）	出力抑制量を最小化し、太陽光発電等の大量導入に伴う系統安定化対策コストを抑制しつつ、太陽光発電等の大量導入と電力系統の安定化を実現する。

事業イメージ



太陽光発電出力予測技術開発実証事業

プロジェクト概要

気候条件、配電系統における電圧・潮流センサー等を活用した太陽光発電の出力予測技術を開発し、系統運用へ活用する

プロジェクトのアウトプット

既存の太陽光発電の出力データ等や気象情報等を活用し、現在確立されていない太陽光発電の出力状況把握や出力予測手法を開発

カスタマー

民間企業
（電力会社、重エメーカーおよびエンジニアリング会社）

プロジェクトのアウトカム

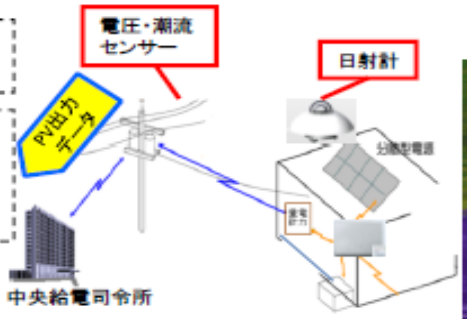
周波数調整、需給調整、再生可能エネルギー電源の有効利用への活用や待機電源の最小化などにつなげていく。

事業イメージ

太陽光発電のマクロでの出力状況の把握

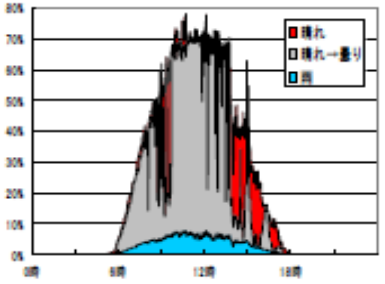
天気予報等を活用した、日単位や数分（3～5分）程度の太陽光発電の出力予測技術を開発

予測技術を開発し、安定的な系統運用へ活用



①太陽光発電の出力変動の予測

②太陽光発電の出力データの把握手法の開発



第３章　技術に関する事業の概要

第３章　技術に関する事業の概要

Ａ．高効率ガスタービン実用化技術開発

A1. 1700℃級ガスタービンの実用化技術開発

１．　事業の目的・政策的位置付け

１－１　事業目的

本事業は、震災以降、我が国の電源構成比率の約 9 割を占める火力発電の高効率化を図り、エネルギーセキュリティーの確保及び地球環境問題双方に対応すべく、世界をリードする高効率ガスタービンの実用化に向けた技術開発を実施する。

高効率天然ガス火力発電は、他の化石燃料に比べて環境負荷が少ない天然ガスを燃料とし、ガスタービンと蒸気タービンの双方を利用する複合発電技術に代表される。ガスタービン技術の性能向上により、発電効率が事業発足時の 52%（送電端、HHV 基準。）から 56%まで向上すれば、二酸化炭素排出量は約 8%の削減が可能である。

（１）事業の科学的･技術的意義

本事業は、複合発電の熱サイクル温度を事業発足時の 1500℃級から世界初の1700℃級に高める。これにより、高温化における我が国のリードを確保する。前例がない未知の領域での技術開発となるため、燃焼技術、冷却技術、遮熱コーティング、空力技術などで、独創性の高い新技術の開発が必要となる。

また、排ガス再循環システムを用いた燃焼器については、排ガス中の CO2 濃度が約 8%となり、CO2 回収が効率的に実施可能な濃度レベルとなる。これが可能となれば、元々CO2 排出原単位が一般の火力発電の中で最も小さい複合発電の CO2 排出量（発電効率 52%で、0.34kgCO2/kWh）を約 0.03kgCO2/kWh と現状比の約 1/10 以下に出来る可能性がある。

さらに 1700℃級ガスタービンが実現できれば、石炭ガス化発電 IGCC にも応用可能であり、1700℃級 IGCC が実現可能となる。このほかに、燃料電池とガスタービンの組合せによるハイブリッドサイクルや、原子力発電の夜間電力を利用して製造した水素燃料を用いた複合発電も可能となる。これらは、エネルギーセキュリティ上重要な将来技術であるが、多様な燃料を使用可能な高温ガスタービンは、これらの革新的な技術の実用化において中核となる技術である。

（２）社会的・科学的意義

（ CO2 削減効果）

地球温暖化問題に対応する CO2 削減効果は、前述のとおりである。

（ 高温化技術の波及効果）

超高温・1 万 G を超える高遠心力の厳しい条件下で 1 年以上の連続運用が求められる発電用ガスタービンは、ロケットエンジンなどと同様、あらゆる機械製品の中でも最も技術の裾野が広く、且つ、先進性の高い機械のうちのひとつであり、高い完成度が求められる。従って、燃焼、伝熱、材料、空力など複数の分野に跨る本プロジェクトの波及効果は非常に大きい。特に高温化技術は、科学技術的にその実用的な目標を与えるという観点でも重要である。

１－２　政策的位置付け

世界の温室効果ガスの排出を 2050 年までに半減するという長期目標を達成するため、革新的な技術開発の重要性が掲げられており、2008 年 7 月に閣議決定された「低炭素社会づくり行動計画」において、2050 年までに二酸化炭素の排出を現状から 60～80%削減するという目標が掲げられている。このような 2050 年に向けた削減努力に対して、経済産業省では「Cool Earth－エネルギー革新技術計画」を設定し、「高効率天然ガス火力発電」を含む 21 分野の技術の開発による目標達成を目指している。これを受け、本計画では、技術開発ロードマップの着実な実施が必要とされている。

また、エネルギー基本計画(2010 年 6 月 18 日閣議決定)において、「その他の火力発電については、新増設・更新の際には、原則としてその時点における最先端の効率を有する設備の導入を目指す。」と謳われており、1700℃級ガスタービンに代表される超高温高効率ガスタービンは、現状最も高効率の火力発電技術として、リプレースにおける大容量機のエネルギー効率向上に寄与できる技術である。

一方、総合科学技術会議の環境エネルギー技術革新計画において、高効率天然ガス発電技術のロードマップが示されている（図１－１）。この中では 2020 年をターゲットに、57%（＊注）の発電効率を目指すことが記載されている。

＊注：本事業開始時では、送電端効率 56%（HHV）を目標としていたが、H24 年度以降の事業では、技術開発の進展や 1600℃級ガスタービンの実績を踏まえ、より効率を高められることが分かった。一方、2020 年時点で欧米他社を凌駕できる効率が必要であることから、目標値を 57%に改めるに至った。

図１－１　技術ロードマップ（出所：技術戦略マップ 2013 年）

１－３　国の関与の必要性

火力発電の高効率化のためには、燃焼、材料等の革新的な技術開発が必要であるが、研究開発成果の商業性や投資回収可能性に係るリスクが大きく、民間企業のみでは対応できない研究開発分野である。実用化まで長期のリードタイムと多大な研究開発投資を必要とする技術開発を推進するには、官民がその方向性を共有する事が不可欠である。

（１）国家エネルギー戦略における位置づけと開発競争のスピード

各国家において、エネルギーセキュリティ・経済性・環境問題の解決の全てに深く関係するため、その先進性・困難性にかかわらず、ガスタービンの高温化はスピードが非常に速く、国家間の開発競争は熾烈を極める。発電用ガスタービンは、1980 年代初頭の複合発電システムの導入以降、年間約 20℃という早いペースで燃焼温度の高温化が進み、熱効率が改善してきた。熾烈な開発競争の中、高温化に対して技術的に開発が可能な国は、米・独・日の 3 カ国に絞られつつある。

（２）本技術分野における我が国の優位性

我が国は、世界に先駆けて 1500℃級のガスタービンを実用化し、発電効率 52%

を達成しており、本分野をリードしている。しかし、世界市場でのシェアで我が国は本事業開始時で 10%程度であり、欧米メーカーが大きくシェアを有するとともに積極的な技術開発を進めている中で、我が国の優位性は予断を許さない状況にある。

従って、厳しい国際競争の中でわが国のリードを保つためには、一刻も早く革新的な技術を実用化して実機に展開する必要がある。このため、1700℃級ガスタービンの開発に取り組むことにより、効率 56%の実用化を目指し、革新的な技術開発を推進する必要がある。

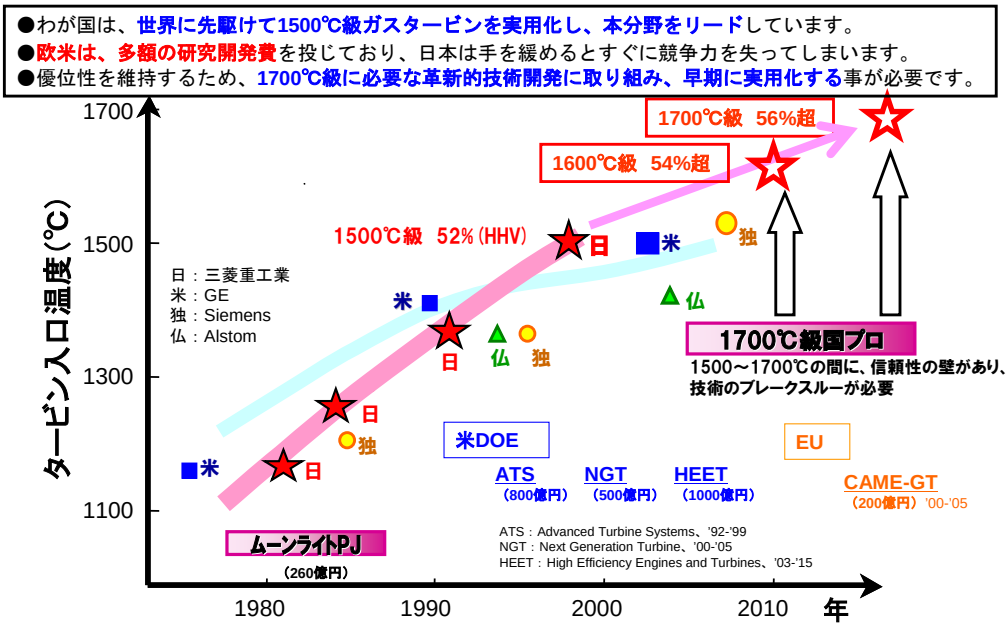


図１－２　各国のガスタービン技術に関する国家プロジェクトと各国の高温化のトレンド比較（事業発足当時）

（３）米国 DOE 支援による技術開発

1700℃級ガスタービンの開発は、石炭ガス化複合発電等、他の発電技術にも適用可能な重要技術であり、米国においてもエネルギー省（DOE）の High Efficiency Engines and Turbines Programs により国家的な支援の下で技術開発が進められている。我が国においても、産学官の連携の下、着実な技術開発により早期の実用化、実証運転による信頼性の確立等を図ることが必要である。

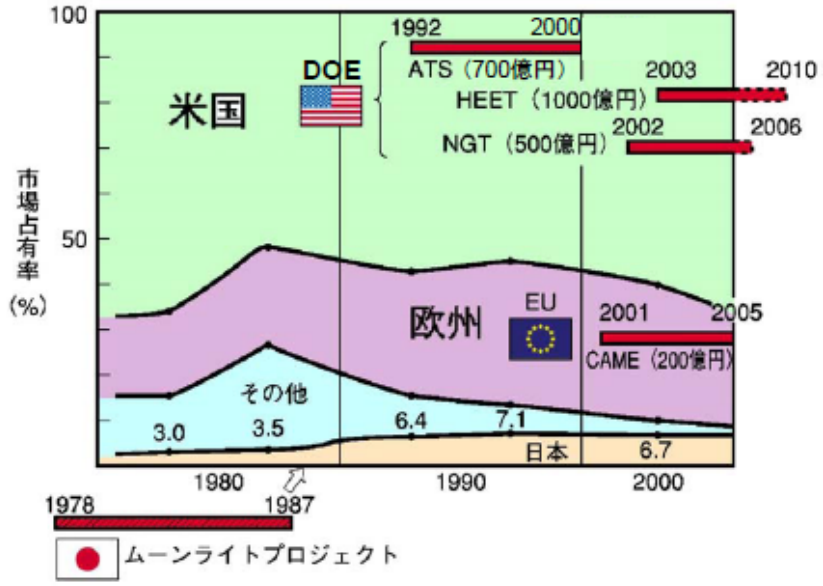


図１－３　ガスタービン技術に関する各国家プロジェクトとシェア実績の推移

（４）省庁間連携

なお、1700℃級ガスタービンの実現の為に不可欠な耐熱材料の開発は、基礎的材質の研究が必要となるため、文部科学省の所掌とし、省庁間で連携をとって技術開発を進めている。

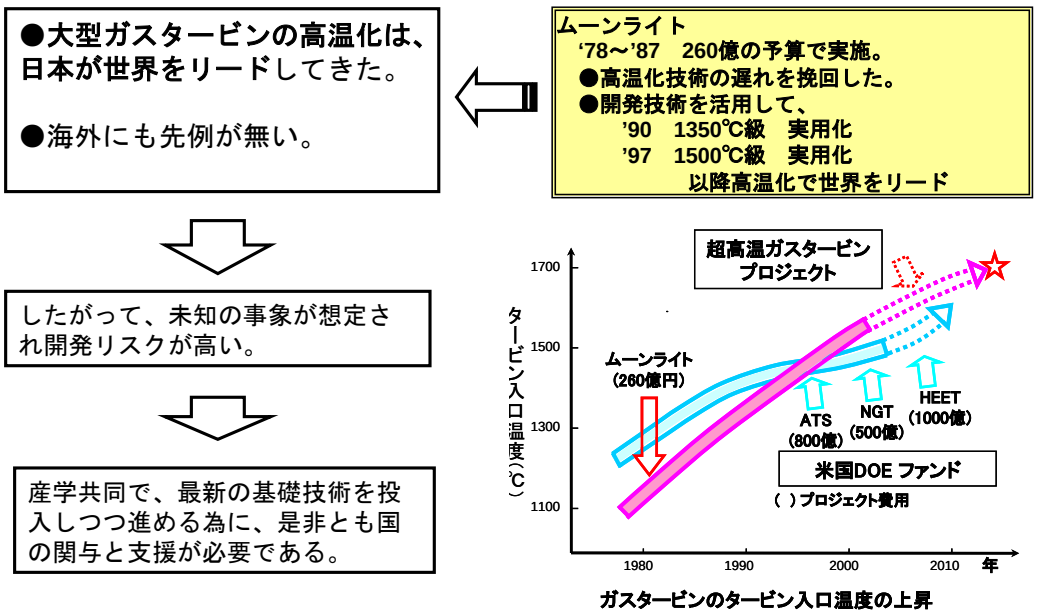


図１－４　ガスタービンの高温化と国家の関与の必要性

1987 年終了の国家プロジェクト“ムーンライトプロジェクト（1350℃級）”の技術を活かして 1990 年度に 1,350℃級が実用化し、1997 年以降の 1500℃級の実用化につながった。国家プロジェクトをきっかけに、我が国は大容量ガスタービンの高温化技術、すなわち、

- 高温での安定燃焼技術と低エミッション技術
- 高温条件下でのタービン・燃焼器の高性能冷却技術
  （冷却空気量を低減し、熱サイクル性能を向上する技術）
- 高温条件下でのタービン･燃焼器の高信頼性・高耐久性設計技術
- 高温条件下での高負荷空力技術
- 高温時の大型ロータ・大型車室の高耐久性設計技術

などの点で世界に追いつき、リードしてきた。

２．　研究開発目標

２－１　研究開発目標

電力産業の保守高度化とリプレース需要にあった大容量機（コンバインド出力 40 万ｋW）の高効率化を目指し、目標送電端効率 56%以上、CO2 排出量 8%削減（事業発足時同容量機比）を達成するために必要な、1700℃級ガスタービンの実用化を図る。そのため、1700℃級ガスタービンの実用化に必要な以下の要素技術開発を行い、システムの成立性をシミュレーションにより確認する。

・排ガス再循環システム／低 NOx 燃焼器の開発
・高性能冷却システムの開発
・低熱伝導率遮熱コーティング（TBC: Thermal Barrier Coating）の開発
・高負荷・高性能タービンの開発
・高圧力比高性能圧縮機の開発
・超耐熱材料の開発（文部科学省のプロジェクト→NEDO 先導研究）

２－２　全体の目標設定

表２－１　全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
１．実機を設計するために必要な要素技術を、より実機に近い条件で評価・検証する。 ２．新開発の要素技術を適用した場合に、送電端効率 56%以上（HHV）を達成可能であることの目処を得る。 ３．高圧高温試験用の装置を製作し、実機相当条件で NOx50ppm 以下を安定的に実現できることを確認する。	より実機に近い条件で新技術を評価することにより、技術課題を明確にする。新たに判明した課題に対して、改良案を立案し、速やかに改良効果を確認することにより、実機開発のリスクを低減する。

２－３　個別要素技術の目標設定

表２－２　個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
排ガス再循環システム／低 NOx 燃焼器の開発	高圧燃焼試験装置を製作し、1700℃実機相当圧で NOx 排出量 50ppm 以下の実現可能性を確認する。	従来の脱硝装置を大幅に増強することなく、煙突出口 NOx を従来並みにする NOx として設定した。
高性能冷却システムの開発	冷却要素に対する回転、乱れなどの影響を評価し、冷却空気量 30%低減（事業発足時比）の実現可能性を確認する。	送電端効率 56%（HHV）達成のため、各要素効率は、信頼性と性能を両立しつつ、世界最高レベルの目標となるよう、各要素目標値に割り振った。
低熱伝導率 TBC* の開発	遮熱効果を現状材(YSZ)より 20%低減可能な候補材を選定し、実翼への最適な成膜条件を求める。 実機相当熱サイクル疲労試験にて耐久性を確認する。	
高負荷・高性能タービンの開発	モデルタービンを用いて効率を計測し、1500℃級に比べ 30%高い負荷条件において、１軸タービン、段数従来並みで、効率 91%以上の実現が可能か確認する。 3 次元設計について、空力・伝熱への影響を把握する。	
高圧力比高性能圧縮機の開発	モデル圧縮機で効率レベルを計測し､圧力比 30 以上において、１軸圧縮機、段数従来並みで、効率 89%以上の実現が可能か確認する。 起動特性や抽気室の空力特性への影響を評価する。	

*　TBC　：遮熱コーティング（Thermal Barrier Coating ）

３．　成果、目標の達成度

３－１　成果

３－１－１　全体成果

平成 20 年度から平成 23 年度にかけ､計画どおりに実用化技術の開発を進め、表３－２で示した要素技術について、それぞれ新コンセプトの効果を確認した。より実機に近い条件で実用化技術試験を実施し、

- 実際の設計適用に当たっての副作用の有無の確認
- 定格条件以外の作動条件における各技術の効果確認
- 製作上の制約などを考慮した条件での形状検討
- 実機形状への製造・施工プロセスの検討

を行い、研究室レベルの基礎技術から、より実用的な技術の開発を進めた。

上記の最新の研究成果を反映したシミュレーションにより､送電端効率 56%以上、CO2 排出量 8%削減（事業発足時同容量機比）の実現可能性を確認し、実証機開発の足がかりを得た。

さらに、1500℃級ガスタービンの運用経験に基づき、上記の革新的な新技術のうち実用化レベルに達したと判断された技術を即座に活用することにより、世界初の 1600℃級ガスタービンの開発に成功し､初号機の商用運転開始を達成した。

表３－１　全体の成果

目標・指標	目標の達成状況
１．実機を設計するために必要な要素技術を、より実機に近い条件で評価・検証する。	１．各要素で実機相当条件で新技術を評価した。
２．新開発の要素技術を適用した場合に、送電端効率 56%以上（HHV）を達成可能であることの目処を得る。	２．最新の要素技術を適用し、予測効率で 56%を上回る目途を得た。
３．高圧高温試験用の装置を製作し、実機相当条件で NOx50ppm 以下を安定的に実現できることを確認する。	３．製作した高温高圧試験装置にて燃焼試験を実施し、実機相当条件で NOx50ppm 以下を安定的に実現できることを確認した。

本技術開発における、要素技術開発項目ごとの主な成果を以下の表３－２に示す。

表３-２　要素技術開発項目ごとの主な成果

項目	目標・指標	目標の達成状況
排ガス再循環システム／低NOx 燃焼器の開発	高圧燃焼試験装置を製作し、1700℃実機相当圧で NOx 排出量 50ppm 以下の実現可能性を確認する。	排ガス再循環を模擬できる高圧燃焼試験装置を製作した。実機相当圧力の燃焼試験により 1700℃低酸素燃焼での燃焼特性を把握し、NOx 排出量 16ppm を安定燃焼状態で達成できることを確認した。
高性能冷却システムの開発	冷却要素に対する回転、乱れなどの影響を評価し、冷却空気量 30%低減（事業発足時比）の実現可能性を確認する。	高性能フィルム冷却、微細冷却構造などの新コンセプト冷却要素試験を実施し、冷却効率 20%以上向上した。 これらを組み合わせた冷却翼を製作し、高温高圧燃焼場における初段静翼の冷却性能を実測した。その結果所定のメタル温度以下であることを確認し、実機での冷却空気量 30%低減の実現可能性に目途を得た。
低熱伝導率 TBC*の開発	遮熱効果を現状材(YSZ)より 20%低減可能な候補材を選定し、実翼への最適な成膜条件を求める。 実機相当熱サイクル疲労試験にて耐久性を確認する。	従来とはまったく異なる第一原理計算を用いた材料探索手法などにより候補材を複数選定した。 溶射皮膜での実機相当熱サイクル試験により、遮熱効果を 20%低減しつつ、現状材並の寿命を確保できることを確認した。 更に、複雑形状物への施工基礎技術を開発し、今回開発した TBC*を 1600℃級ガスタービンの第１段動･静翼に適用した。その結果、2200 時間運転後（平成 23 年度末）の検査にて健全な状況であことを確認した。

＊　TBC　：遮熱コーティング（Thermal Barrier Coating ）

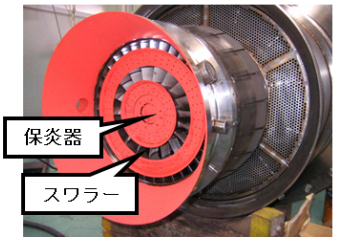
高負荷・高性能タービンの開発	モデルタービンを用いて効率を計測し、1500℃級に比べ 30%高い負荷条件において、１軸タービン、段数従来並みで、効率 91%以上の実現が可能か確認する。 3 次元設計について、空力・伝熱への影響を把握する。	新開発の高性能プロファイルと、翼・端壁一体設計新コンセプト 3 次元翼型を組み込んだ回転翼列要素試験を実施し、1500℃級ガスタービンに比べ 30%高い負荷条件において、実機換算で 91.3%の効率を達成可能であることを確認し、伝熱への影響も確認した。 （更に、ディフューザのストラット形状の改良や入口速度分布の改良などの新しいアイデアの導入により、タービン効率の更なる向上が期待できることを確認した。）
高圧力比高性能圧縮機の開発	モデル圧縮機で効率レベルを計測し、圧力比 30 以上において、１軸圧縮機、段数従来並みで、効率 89%以上の実現が可能か確認する。 起動特性や抽気室の空力特性への影響を評価する。	大型ガスタービンで要求される１軸圧縮機を想定したモデル圧縮機を用いて回転翼列要素試験を実施し、新コンセプトの 3 次元設計翼により、実機換算で 89.3%の効率を達成可能であることを確認した。 安全に起動可能であることと、抽気室の空力への影響を把握した。

３－１－２　個別要素技術成果

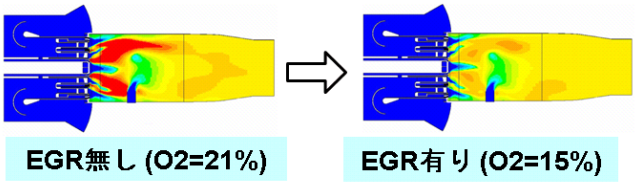
（１）排ガス再循環システム／低 NOx 燃焼器の開発

排ガス再循環を模擬できる高圧燃焼試験を製作し燃焼試験を実施。NOx は実機換算で16PPM＠ 15%O2（＜目標50ppm）を達成する見込みを得た。

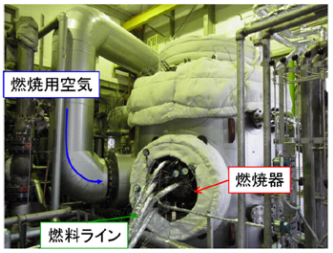
新コンセプト試作燃焼器



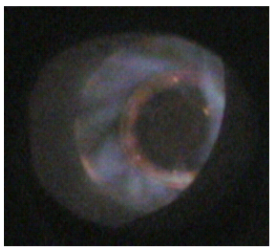
低酸素燃焼による局所の燃焼温度の低減



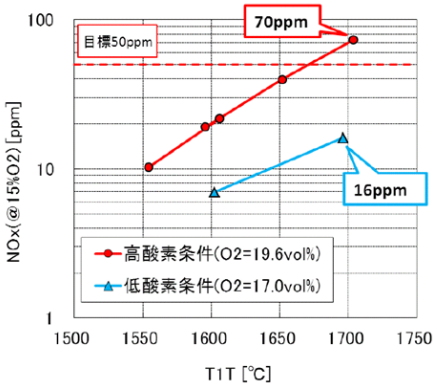
高圧燃焼試験設備



燃焼状況



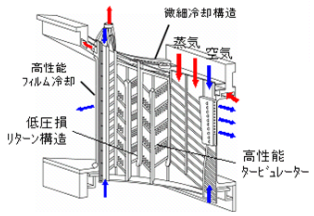
NOxの計測値



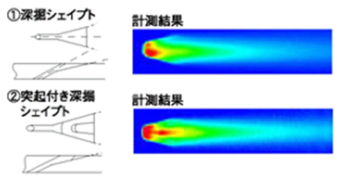
（２）高性能冷却システムの開発

先進冷却要素技術を開発し、実機を模擬した条件において、フィルム冷却効率を把握した。また、高温高圧燃焼場において冷却性能を実測し、所定のメタル温度以下であることを確認し、従来機に比べ、冷却空気量30%削減の目処を得た。

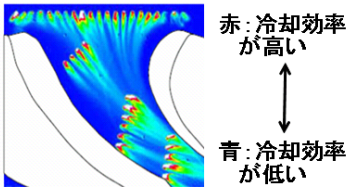
1700℃級冷却コンセプト例



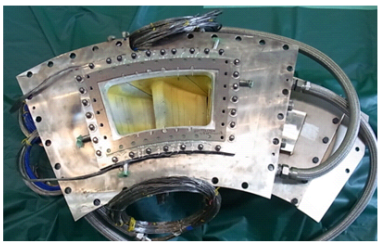
先進冷却要素の開発例

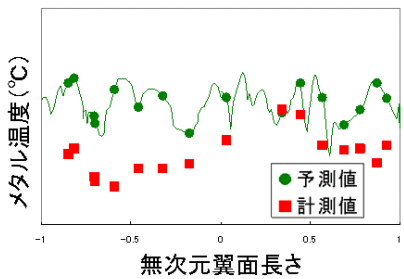


回転試験での冷却効率



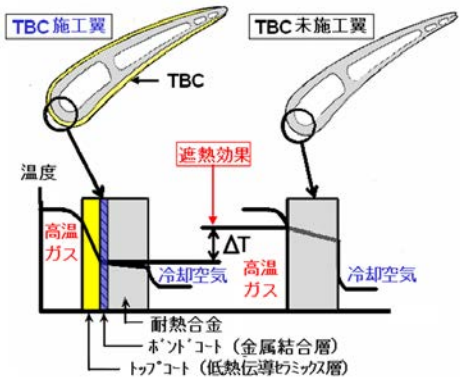
高温高圧燃焼場での試験結果





（３） 低熱伝導率 TBC の開発

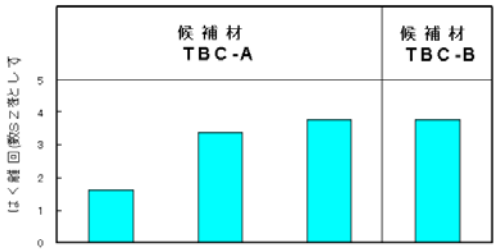
遮熱コーティング TBC
(Thermal Barrier Coating)
のイメージ図



遮熱効果を20%向上したセラミクス材（目標を満足）を開発し、実機ガスタービンと同様に温度勾配を付与するため、CO_2レーザを用いた熱サイクル試験を実施し、先進セラミクスを用いたTBCの耐久性は通常のYSZと同等以上であることを確認した。

(a)ﾚｰｻﾞ熱ｻｲｸﾙ試験装置

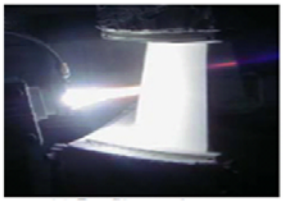
(b)熱ｻｲｸﾙ試験状況



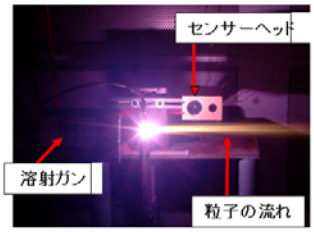
(c)熱ｻｲｸﾙ試験結果（最高TBC表面温度：1400℃
TBC内温度差：500℃）

開発したセラミクス材を用い、実翼への施工を想定した溶射条件の最適化を実施した。

実翼へのプラズマ溶射施工状況

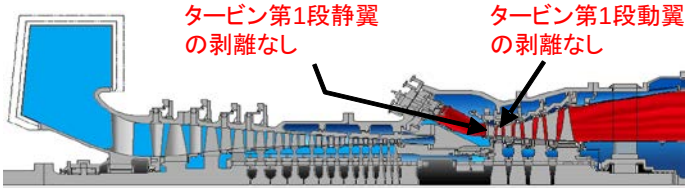


プラズマ溶射施工条件の最適化



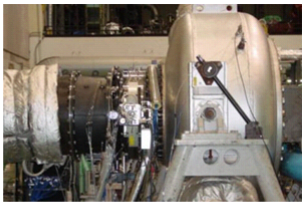
開発したセラミクス材を第１段動・静翼に施工し、1600℃級ガスタービンにおいて長時間の耐久試験を実施しました。その結果、剥離などの問題が発生しないことを確認した。

1600℃級ガスタービンでの第１段動・静翼　遮熱コーティングの運転後点検結果



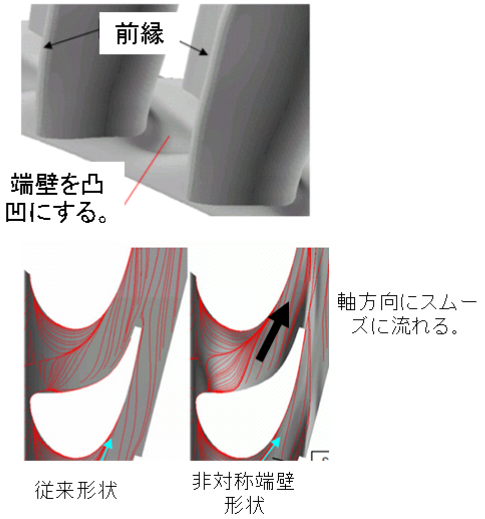
（４）高負荷・高性能タービンの開発

実機流れを模擬した回転試験に加え、実レイノルズ数での高速翼列試験を実施し、先進3次元設計コンセプトを検証しました。その結果、実機相当で効率91.3%（＞目標91%）を達成可能である目処を得た。

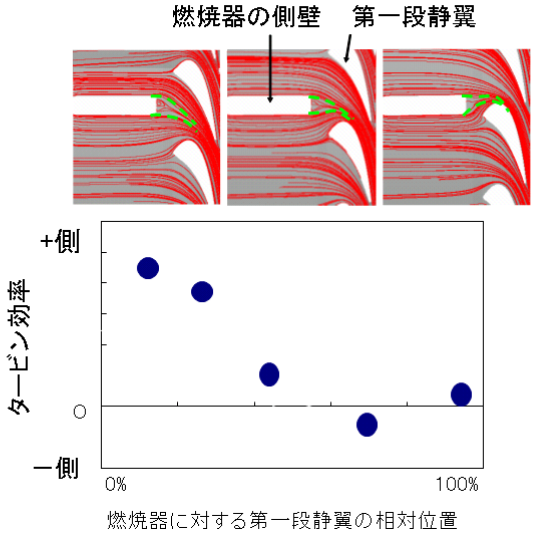


高速回転翼列試験装置

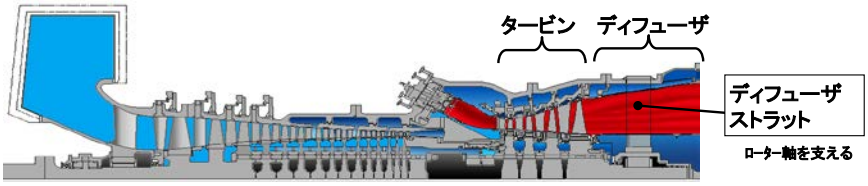
先進3次元設計コンセプト



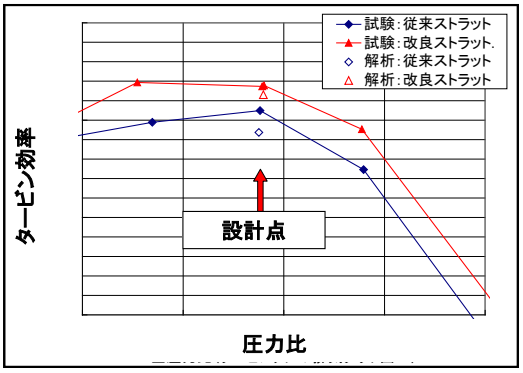
燃焼器とタービンの配置最適化



ディフューザストラットの断面形状を最適化することで、タービン全段効率が向上することを試験にて確認した。

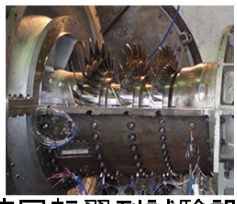


断面形状の最適化によるタービン効率向上

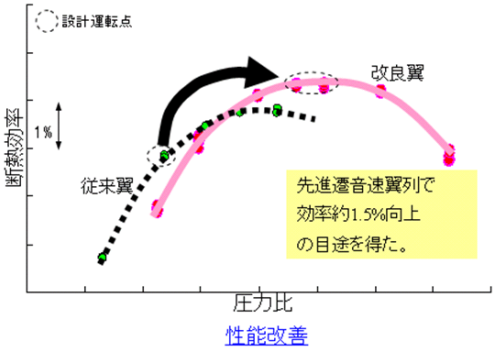


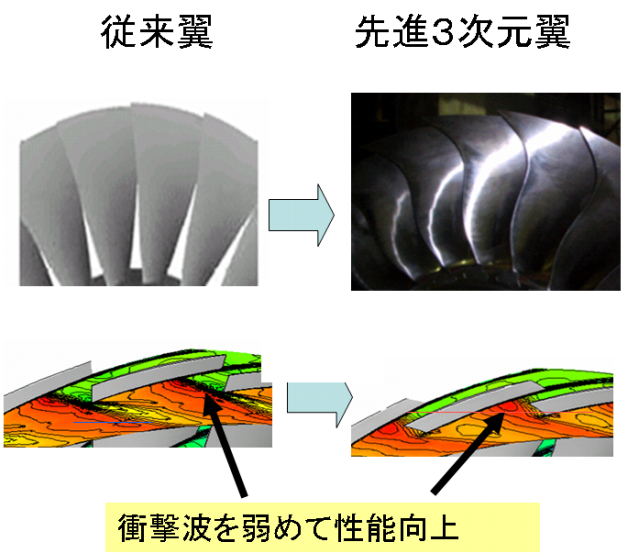
（５）高圧力比高性能圧縮機の開発

先進3次元空力設計技術により、遷音速段では衝撃波を制御、亜音速段では2次流れを制御することにより、いずれも性能を約1%以上向上しました。高速回転翼列試験により、実機での効率は89.3%（＞目標89%）を達成可能である事を確認した。
さらに、起動条件も含めた運用性の確認を実施した。



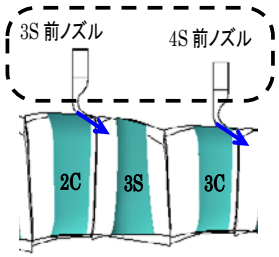
高速回転翼列試験設備

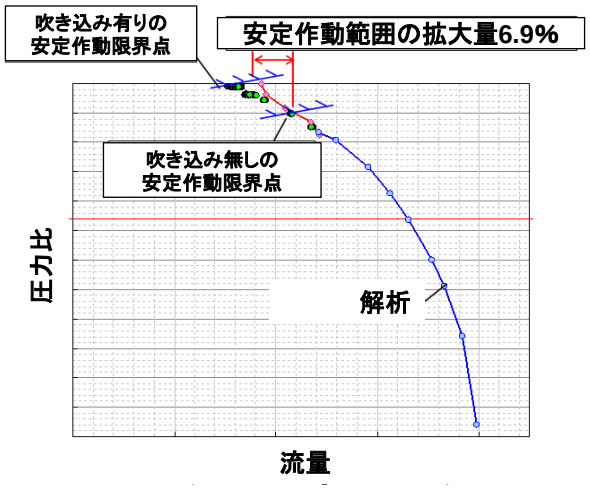




安定作動範囲の拡大を狙い、翼の先端に空気を吹き込む方式を採用し、安定作動範囲を6.9%拡大できる結果を得た。

翼先端への空気吹き込み





３－１－３　特許出願状況等

本実用化技術開発の開始から申請を行った特許・論文等の総件数を表 3−3 に示す。また、それぞれの内容について、リスト化したものを表 3−4 に示す。

表３－３　特許・論文等件数

論文数	投稿	発表	特許等件数（出願含）	電力会社の視察回数
５	１０	４２	３７	２１０

表３－４　論文、投稿、発表リスト

(論文)

	題目・メディア等	時期
論文	三菱重工技報 VOL.45 NO.1「火力プラントの高効率化への取り組み」	H20.1
	三菱重工技報 VOL.46 NO.1「高性能ガスタービンの最新空力設計技術」	H21.1
	三菱重工技報 VOL.47 NO.1「超高温ガスタービンの要素技術の開発」	H22.1
	三菱重工技報 VOL.47 NO.1「CO2 回収型 IGCC クリーンコール技術の商用化」	H22.1
	三菱重工技報 VOL.48 NO.3「超高温ガスタービンの要素技術の開発」	H23.7

（投稿）

	題目・メディア等	時期
投稿	月刊「ターボ機械」 35 周年記念特集「地球温暖化対策とガスタービン」	H20.7
	電気評論「高効率天然ガス火力発電＜高効率複合発電の実績と 1700℃級ガスタービンの要素技術開発＞」	H20.7
	火力原子力協会特集号「今後のコンバインドサイクル発電設備の動向」	H20.7
	日本ガスタービン学会誌 9 月号「1700℃級ガスタービンの空力技術」	H20.9

	日本ガスタービン学会第 36 回定期公演会「高負荷タービンへの 3 次元エンドウォールの適用」	H20.10
	月刊「ターボ機械」11 月号 「次世代コンバインドサイクルシステム実用化の進展と課題」	H20.11
	日本ガスタービン学会誌 3 月号「ガスタービン高温化技術の開発」	H21.3
	配管技術「ガスタービンコンバインドサイクルプラントへの取り組み」	H21.5
	エネルギー・資源学会「低炭素社会への挑戦」 「天然ガスを燃料とする火力発電　コンバインドサイクル」	H22.1
	エネルギー・資源学会 Vol.31　NO.2(2010)特集　大型火力発電の革新技術「1700℃級ガスタービンの技術開発」	H22.3

（発表）

	題目・メディア等	時期
発表	大阪大学第 2 回 FD セミナー「 1700℃超高温ガスタービン要素技術開発（国プロ）への取組み状況について」	H20.1
	日本ガスタービン学会　第 36 回セミナー 「1700℃級ガスタービン用 TBC の開発状況」	H20.1
	第 20 回 翼列研究会「タービン非対称エンドウオールに関する研究」	H20.3
	（社）火力原子力発電技術協会　エネルギー・新発電技術に関する講演会「次世代高温ガスタービン開発への取り組み」	H20.4
	中部電力セミナー「1700℃級ガスタービンの技術開発」	H20.5
	日本機会学会年次大会「1700℃級ガスタービン高性能フィルム冷却の開発」	H20.6
	動力シンポジウム 2008「1700℃級ガスタービン燃焼器の LES 解析」	H20.6
	ASME Turbo Expo 2008 Panel Discussion 「The Pathway Forward Future Products and Technology」	H20.6
	ASME Turbo Expo 2008 「 Development of Combustor with Exhaust Gas Recirculation System for the Next Generation Gas Turbine Combined Cycle」	H20.6
	ASME Turbo Expo 2008 Panel Discussion「Towards 2020 - Materials Needs for Advanced Gas Turbines of the Future」	H20.6

	日本ガスタービン学会第 36 回定期公演会「高負荷タービンへの 3 次元エンドウォールの適用」	H20.10
	The 4th International Gas Turbine Conference「Inroduction of the Next Generation 1700℃ Class Gas Turbine Engine Development Project」	H20.10
	岩手大学システム理工学系シンポジウム「エネルギー環境問題への重工・重電メーカの取り組み」において、「ガスタービンプラントの高効率化」	H21.1
	社）火力原子力発電技術協会講演会「次世代高温ガスタービン要素技術開発」	H21.1
	日本内燃機関「Development of Combustor with Exhaust Gas Recirculation System for the Next Generation Gas Turbine Combined Cycle」	H21.3
	ASME Turbo Expo 2009 基調講演 「Long Term Perspectives & Sustained R&D Efforts are the Keys to Success」	H21.6
	ASME Turbo Expo 2009 Panel Discussion 「The Pathway Forward Future Technology」	H21.6
	Proceedings of the ASME Turbo Expo 2009, GT2009-59783, 「 DEVELOPMENT OF KEY TECHNOLOGIES FOR THE NEXT GENERATION 1700C-CLASS GAS TURBINE」	H21.6
	ACGT2009「Large Frame Gas Turbines Latest Development for High Efficiency」	H21.9
	日本ガスタービン学会第 37 回定期公演会「回転動翼プラットホームにおけるフィルム冷却に関する研究」	H21.10
	International Conference on Power Engineering-09 「 DEVELOPMENT OF ADVANCED TECHNOLOGIES FOR THE NEXT GENERATION GAS TURBINE」	H21.11
	International Conference on Power Engineering-09 「 DEVELOPMENT OF COMBUSTOR WITH EXHAUST GAS RECIRCULATION SYSTEM FOR THE NEXT GENERATION GAS TURBINE」	H21.11
	東大生産技研講演会 「1700℃ガスタービンの開発状況―要素技術開発について―」	H22.1
	PowerGen Europe Amsterdam 「 Development of a New 1,600°C Turbine Inlet Temperature Large Frame Gas Turbine for High Combined Cycle Efficiency」	H22.5

	東京大学先端エネルギー変換工学寄付研究部門第３回技術フォーラム「高効率発電におけるガスタービン技術の進捗」	H22.6
	ASME Turbo Expo 2010 Panel Discussion 「The Pathway Forward Future Technology」	H22.6
	ASME Turbo Expo 2009, GT2009-59783,「 DEVELOPMENT OF KEY TECHNOLOGIES FOR THE NEXT GENERATION 1700C-CLASS GAS TURBINE」	H22.6
	ASME Turbo Expo 2009 基調講演 「Long Term Perspectives & Sustained R&D Efforts are the Keys to Success」	H21.6
	ASME Turbo Expo 2009 Panel Discussion 「The Pathway Forward Future Technology」	H21.6
	Proceedings of the ASME Turbo Expo 2009, GT2009-59783,「 DEVELOPMENT OF KEY TECHNOLOGIES FOR THE NEXT GENERATION 1700C-CLASS GAS TURBINE」	H21.6
	ACGT2009「Large Frame Gas Turbines Latest Development for High Efficiency」	H21.9
	ASME Turbo Expo 2010, GT2010-23233, 「DEVELOPMENT OF KEY TECHNOLOGIES FOR THE NEXT GENERATION GAS TURBINE」 ★ASME Best Paper 賞受賞	H22.6
	日本金属学会 本多記念講演 湯川記念講演 『火力発電プラントへの溶射技術の応用』	H22.10
	ASME Turbo Expo 2011 「DEVELOPMENT OF KEY TECHNOLOGIES FOR THE NEXT GENERATION HIGH TEMPERATURE GAS TURBINE」	H23.6
	第 39 回日本ガスタービン学会定期講演会（松本）「1700℃級ガスタービン排ガス再循環システムの燃焼器開発」	H23.7
	International Gas Turbine Congress 2011 Osaka 「Progress in Technology Development for the Next Generation High Temperature Gas Turbine」	H23.11
	International Gas Turbine Congress 2011 Osaka 「Aero and Aero-Thermal Characteristics of Turbine Rotor Blade's Platforms」	H23.11
	International Gas Turbine Congress 2011 Osaka 「Development of Combustor with Exhaust Gas Recirculation system for 1700℃ class Gas Turbine」	H23.11

	International Gas turbine Congress 2011 Osaka 「Development of Advanced Thermal Barrier Coating for the Next Generation Gas Turbine」	H23.11
	ASME Turbo Expo 2012 Electric Power / Panel Session 「The Pathway Forward: Future Gas Turbine Products and Their Enabling Technologies」	H24.6
	産学官連携推進会議＜第 11 回＞イノベーションジャパン 2012 「日本経済団体連合会会長賞：1700℃級ガスタービン冷却技術の開発」	H24.9
	第 40 回日本ガスタービン学会定期講演会（釧路）「1700℃級ガスタービン排ガス再循環システムの燃焼器開発」	H24.10

３－２　目標の達成度

研究開発の目標に対する達成度を表３－５に示す。目標は全て達成した。

表３－５　目標に対する成果・達成度の一覧表

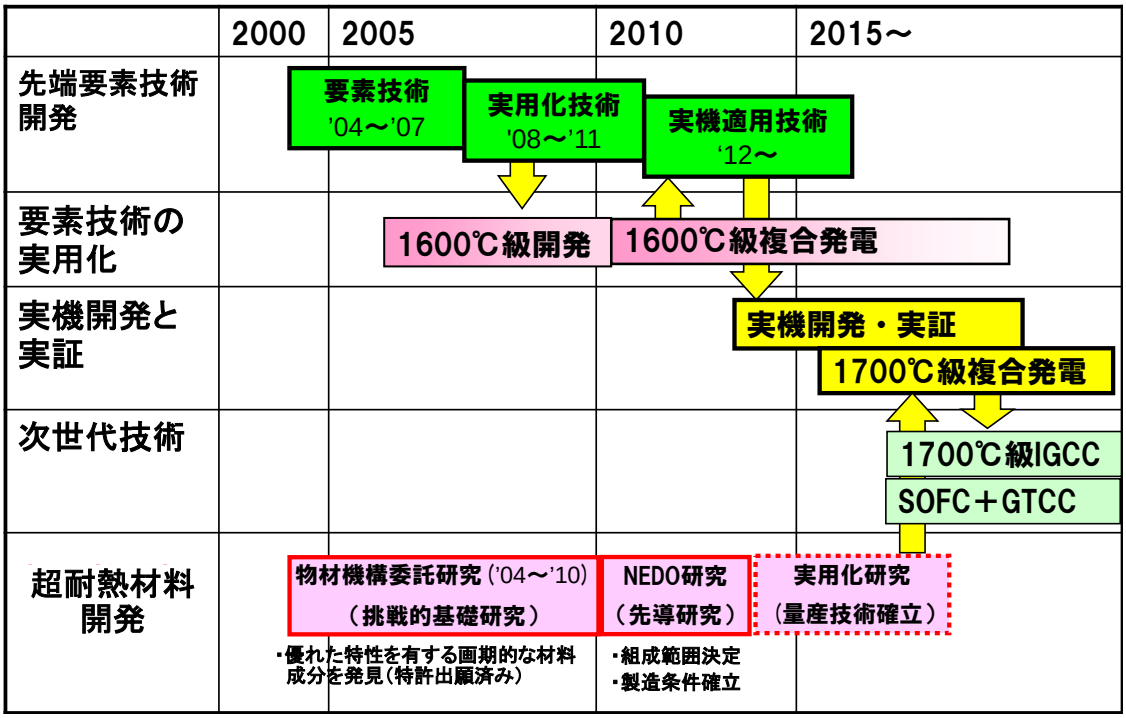
要素技術	目標・指標	成果	達成度
全体の目標	コンバインド効率 56%以上（HHV）	最新のデータを反映した予想値は 56%（HHV）を上回る目途を得た。	達成
排ガス再循環システム／低 NOx 燃焼器の開発	NOx 排出量 50ppm 以下	実機相当圧力で NOx 排出量 16ppm を確認した。	達成
高性能冷却システムの開発	冷却空気量 30%低減（事業発足時比）	冷却空気量 30%低減（事業発足時比）の目処を得た。	達成
低熱伝導率 TBC の開発	遮熱効果を現状材(YSZ)より 20%向上	遮熱効果を現状材(YSZ)より 20%向上低減した。	達成
高負荷・高性能タービンの開発	1500℃級ガスタービンに比べ 30%高い負荷条件において、１軸タービン、段数従来並みで、効率 91%以上	回転翼列試験により 91.3%の効率達成の目処が得られた。	達成
高圧力比高性能圧縮機の開発	圧力比 30 以上において、１軸圧縮機、段数従来並みで、効率 89%以上	回転翼列試験により、89.3%の効率達成の目処が得られた。	達成
総合評価	ー	目標を全て満足している。	達成

４　事業化、波及効果について

４－１　事業化の見通し

1700℃級ガスタービン実用化に当たっては、1500℃級ガスタービンの開発で得られた知見の延長線上での開発が困難であり、全く未知の領域での開発が必要となることから、以下の実用化までのロードマップに示すように、段階を踏んで開発を進めることによりリスク低減を図り確実に技術開発を進めることとしている。

表４－１　1700℃級ガスタービン実用化のロードマップ



これまでの検討を通じて、1700℃級ガスタービンの実現の為に必要となる燃焼、材料等の革新的な要素技術の完成度を、各要素試験や解析検討、より実機に近いモジュール試験を通じて、実用可能なレベルであることを確認した。

前述のように、各国家において、エネルギーセキュリティ、経済性、環境問題の解決の全てに深く関係するため、その先進性・困難性にかかわらず、ガスタービンの高温化はスピードが非常に速く、国家間の開発競争は熾烈を極める。従って、厳しい国際競争の中でわが国のリードを保つためには、一刻も早く当該技術を実用化して実機に展開する必要がある。

一方で、およそ 700℃～900℃の高温・1 万 G を超える高遠心力の厳しい条件

下で 1 年以上の連続運用が求められる発電用ガスタービンは、あらゆる機械製品の中でも最も技術の裾野が広く、且つ、先進性の高い機械のうちのひとつであり高い完成度が求められる。従って、1500℃級から 1700℃級に、一足飛びに200℃高温化することは大きなリスクを伴うことも事実である。そこで、ガスタービンの高温化における我が国のリードを保ち、且つ、1700℃級ガスタービンの実現の足掛かりとするために、本プロジェクトと並行して、1600℃級ガスタービンの開発を実施した。

すなわち、我が国の 1500℃級の経験を基礎としつつ、本プロジェクトの要素試験・解析・モジュール試験を経て、その有効性や信頼性が確認できた革新的要素技術に関しては即時実用化することにより、世界で初めてとなる 1600℃級 J 形ガスタービンを開発した。現在、2011 年 2 月からの試運転でデータを取得し、同年 12 月に関西電力様に商用機を出荷した。2013 年 8 月からは商用運転に入っており、高効率かつ安定的な電力供給に貢献している。

事業発足当時の 1500℃級から 100℃高温化した未知の世界での運用実績を蓄積すると共に、実運用を通じてしか知ることの出来ない技術課題の抽出を行なっている。

４－１－１　要素技術開発成果の既存機種への適用、実用化について

高性能冷却システムと、低熱伝導率遮熱コーティングなどについては、既存機へ適用する場合の改良範囲が比較的少ないため、1500℃級ガスタービン(*)の性能向上を目的にタービン翼への適用を実施した。具体的には、三菱重工業（株）高砂製作所内の 1500℃級ガスタービンにて、試験適用して実績を評価し、量産機に展開した。

(*)　1500℃級は、現在世界トップの高温レベルであるが、既に 10 年間の実績があり、高温部のガス温度分布やメタル温度などのデータが揃っているため、新技術を適用可能と判断した。

他の要素についても、複数の既存機種への適用を予定しており、1700℃級の実用化に先立ち、以下の大きな効果を期待している。

- 国プロ技術導入効果により、効率向上が加速
  - 1400℃～1500℃級ガスタービンへ新技術を展開することにより、H18 年度からの 10 年間で平均約 2%発電効率を向上した。
  - 世界初の 1600 度級ガスタービンの開発により、発電効率を 54%（HHV）以上へ向上した。

● CO2 削減効果（国内）
  - ガスタービン効率向上分　約 450 万トン（10 年間）
  - 微粉炭焚火力からガスタービンコンバインドへ置換　約 1500 万トン（10 年間で 5 プラントと仮定した場合）

● 経済効果
  - 上記効率向上により、技術開発競争が熾烈な市場において、大型ガスタービン 20 台/年から 30～40 台/年に競争力向上
  - 3000 億円～5000 億円の経済効果が期待できる。

４－１－２　1700℃級ガスタービンの事業化の見通しについて

（市場規模）

先進国および開発国のいずれも、電力需要が伸びており、ここ数年で、40 ギガワット→45 ギガワットに世界市場が拡大した。特に、燃料価格の高騰と高止まり、環境問題の深刻化により、高効率ガスタービンの需要が伸びている。

日本、米国、EU、アジアの一部を中心に、1400℃級→1500℃級へ主力機が移行している。引き続き、超高性能機へ移行していくことは確実であり、大型ガスタービンの台数で年間 200 台程度の市場規模は十分期待できる。したがって、現在高温化で世界をリードしているわが国が、先行開発をしていくことは需要側からの期待も大きい。

（環境問題）

ここ数年、地球温暖化に対するニーズが高まっている。

経団連の自主行動計画である電気事業連合会の CO2 排出原単位の目標

1990 年：0.42kg-CO2/kWh　⇒　2010 年：　0.34kg-CO2/kWh

（原子力を含むすべての発電設備の平均値）

に対して、1700℃級複合発電では、0.31 ～ 0.32kg-CO2/kWh であり、目標を上回る初の火力発電システムとなる。

さらに、1700℃級で検討しているＥＧＲ（排ガス再循環システム）を用いることにより、排ガス中の CO2 濃度を高くすることができるため、CO2 回収を他のどの火力発電システムより、安価に実現することが可能となる。

（信頼性確保）

事業発足時の 1500℃級と比較して、1700℃級複合発電設備の実用化に

対しての懸念事項として、信頼性確保が挙げられる。

信頼性確保については、通常のガスタービンと同様、要素技術開発に引き続き、実用化技術開発を実施することにより、実設計に入る前のリスク低減を図る。また、上述のように 1500℃級ガスタービンの経験を活かし、また、1600℃級 J 形ガスタービンに先行適用することにより、総合的な信頼性向上を行うことが可能となる。

（経済性）

事業発足時の 1500℃級と比較して、1700℃級複合発電設備を実用化する場合、設備のコストアップが懸念事項としてある。これについては、プラント全体に占めるガスタービンのコスト割合が、約 15%程度と少ないため、性能向上（約 53%→56%）による燃料消費量低減効果と比較することにより、十分な経済性があると判断される。(Gas Turbine World 2006 Handbook より概算)

複合発電のプラント初期設備費を 100 とした場合の金額の概略比較を示す。

・複合発電のプラント初期設備　100
・ガスタービン本体　約 15
・1700℃級によるコストアップ(仮に 10%～20%とする)
　約＋1.5～3.0　(A)
・1 年間の燃料代（ベースロード運用）　200～300
・1700℃級導入による燃料代低減（+3/53）　Δ11～Δ17　(B)

コストアップ額 (A) よりも、燃料代低減額(B)のほうが圧倒的に大きく、経済的には、性能向上のメリットが大きい。

1700℃級ガスタービンの要素技術開発には、国内外の電力会社から高い関心を寄せられており、これまでに多くの電力会社の要求により、延べ約 210 回の視察・報告会を開いている。

開発事業化には、立地も含め、これらの電力会社の協力が不可欠であり、将来の事業計画について交渉していく。

４－２　波及効果

本技術開発により、世界最高効率の 1700℃級ガスタービン技術確立の目処を得た。本技術により、既成ガスタービンよりも少ない燃料で発電することが可能となり、限られた化石燃料の有効利用、発生 CO2 量の削減に貢献することが

出来る。

上述のように、開発した革新的な技術のうち、実記適用可能と判断されたものは、世界初の 1600℃級 J 形ガスタービンの実用化に適用された。これにより、我国のコンバインド発電技術の優位性を保つことが出来る。また、1500℃級をはじめとする既存のガスタービンへの技術的適用も進められており、大型の発電用ガスタービン全体の競争力強化の点で波及効果は大きい。

さらに、高効率高温ガスタービンは、石炭ガス化発電 IGCC の主機の一つとして、そのまま適用可能である。1700℃級の IGCC が実現すれば、燃料の多様化によるエネルギーセキュリティー上のメリットに加え、発生 CO2 量の大幅な削減が期待できる。

・　高効率ガスタービンの開発により、国家的に補助されて伸長している欧米のメーカに対して、高い競争力を有する高性能ガスタービンの製造が可能になり、国内・海外の新規プラントに対して国産機の受注増大、外貨獲得が見込めるので、国内関連産業への波及効果も含めて国益になる。（米国エネルギー省(DOE)の国家プロジェクトでは米国ガスタービンメーカ、大学に 1992 年から 10 年間で約 800 億円を投資。また、ＥＵでも、要素技術開発を実施中。）

・　現在急拡大する中国市場への進出の代償として、中国メーカへの技術移転を要求される。将来中国との競争で生き残るためには、ガスタービンに適用される高度総合機械技術のエッセンスである要素技術を次のステップに進化させる国家プロジェクトが、日本産業界にとっても重要な意味を持つ。

・　本プロジェクトで開発される超高温ガスタービン技術は、本技術は、LNG 焚き複合発電以外に、
　・IGCC 用ガスタービンの高効率化
　・将来の水素(*)燃焼ガスタービン
　　(*)IGCC からの水素製造、原子力夜間電力による水素製造
に展開可能である。いずれに対しても総合効率を決めるキーテクノロジーであり、今後の燃料多様化、エネルギーのベストミックスに対して有効な技術となるため、　日本産業界の競争力強化のために非常に価値がある。

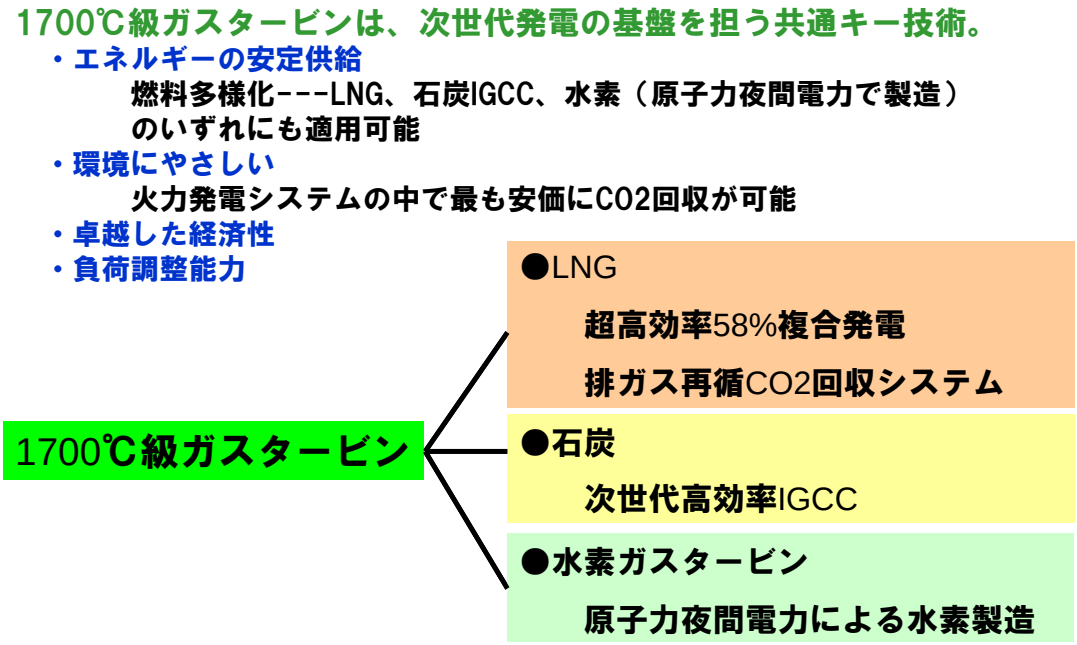


図４－１　次世代発電技術の基盤を担う共通技術

５．　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

５－１　研究開発計画

表５－１　研究開発計画

	H20年	H21年	H22年	H23年
高圧力比高性能圧縮機	前方段モデル試験 中間段モデル試験	改良設計	改良モデル圧縮機試験	圧縮機モジュール試験
高負荷高性能タービン	高圧段モジュール試験 高精度流動解析	低圧段モジュール試験	改良モジュール試験	高温高圧翼列試験
高性能冷却システム	冷却コンセプト検討 実用化モジュール試験装置検討	高圧高温翼列設計	供試翼、試験装置製作 中圧高温翼列試験	
排ガス再循環システム／低NOx燃焼器の開発	燃焼器基本計画 高圧燃焼装置基本計画	実用化サイクルシステム検討 実用燃焼器製作 詳細設計	高圧燃焼装置製作	高圧燃焼試験
低熱伝導率遮熱コーティング	経年変化特性評価 実用化溶射条件　及び　寿命評価技術	材質改良	試験翼への成膜 高品位実用化成膜技術	
予算額（百万円）※	324	559	615	689

※補助金ベース

５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、三菱重工業(株)が経済産業省からの補助金を受けて実施した。また、再委託先として大阪大学、九州大学、北海道大学、大阪工業大学が参加した。

また、研究開発の実施に当たっては、研究開発を統括するためのプロジェクトリーダー（三菱重工業(株)　伊藤栄作）を任命した。

さらに、超耐熱材料の開発にあたっては、他の要素技術に比べてより基礎的な研究からスタートする必要があること、技術開発に時間がかかることなどの理由により、省庁間連携として文部科学省と物質・材料研究機構が、委託先である三菱重工業(株)と研究を実施した。

○　プロジェクトリーダー：　三菱重工業（株）　伊藤栄作

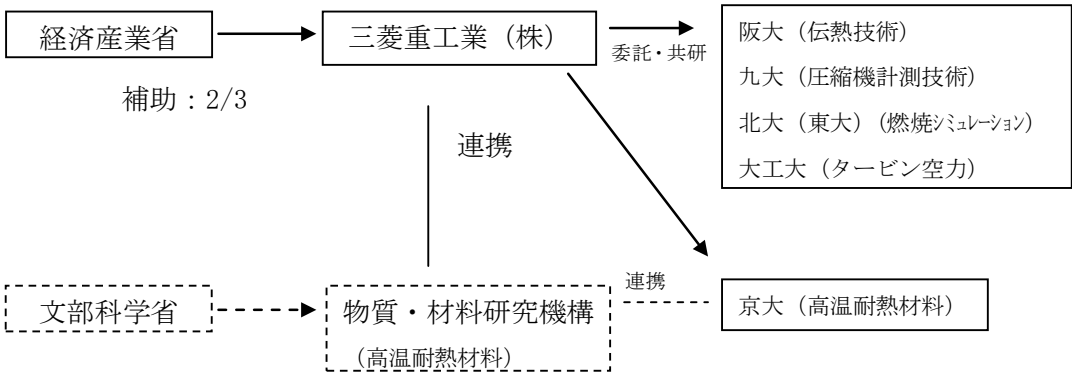


図５－１　研究開発実施体制

５－３　資金配分

表５－２　資金度配分　　（単位：百万円）

年度　平成	２０	２１	２２	２３	合計
排ガス再循環システム／低 NOx 燃焼器の開発	70	224	260	263	817
高性能冷却システムの開発	56	77	84	108	325
低熱伝導率 TBC の開発	78	85	94	115	372
高負荷・高性能タービンの開発	59	90	84	97	330
高圧力比高性能圧縮機の開発	61	83	93	106	343
合計	324	559	615	689	2187

５－４　費用対効果

本事業には 4 年間で約 22 億円の補助金が投じられ、ガスタービンを用いたコンバインドサイクルとしては世界最高の発電効率である 56%（HHV）を達成する目処をつけるなどの成果をあげた。

さらに、石炭石油焚きの老朽火力発電設備の高効率コンバインドサイクル発電設備へのリプレース需要が高まっており、この場合は、効率の向上量が大きくなるため、さらに大きな燃料削減効果が期待できる。

1700℃級の高効率ガスタービンを開発した場合、既設の重油焚き、石炭焚き火力発電の 30%～50%の発電出力を 1700℃級複合発電に置き換えると、発電所から発生する CO2 発生量の 10～17%（＊）が削減可能である。

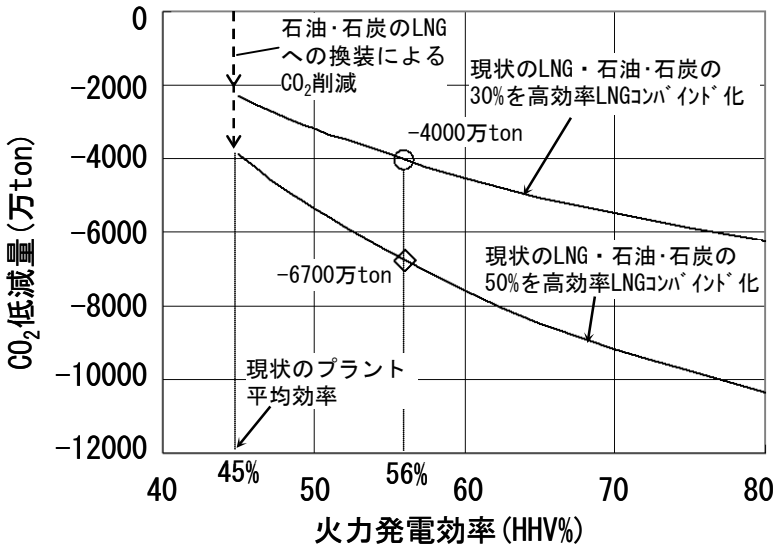
（＊）我が国の電気事業全体からの CO2 排出量約４億トンとの比較。なお、ベースは、電中研予測の図５－３の「わが国における電源構成の推移（後出）」に基づいている。

また、排ガス再循環システムでは CO2 回収が、他のシステムより低コストで実現可能となる可能性がある。この場合は、CO2 排出原単位は 0.03kg-CO2/kWh 程度とできる。

既設の火力発電所の 30%～50%を 1700℃級ガスタービン高効率コンバインドプラントに置き換えると、原油換算で 1300 万～2200 万トン/年の省エネ効果がある。

表５－３　1700℃級複合発電による CO2 削減効果／省エネルギー効果

置きかえる既存発電所の割合	CO_2削減量	全発電所の排出量に占める割合	省ｴﾈﾙｷﾞｰ効果 (原油換算)
30%	4000万ton/年	10%	1300万トン
50%	6700万ton/年	17%	2200万トン



1700℃級ガスタービンCO_2低減効果

図５－２　1700℃級ガスタービン導入による CO2 低減効果

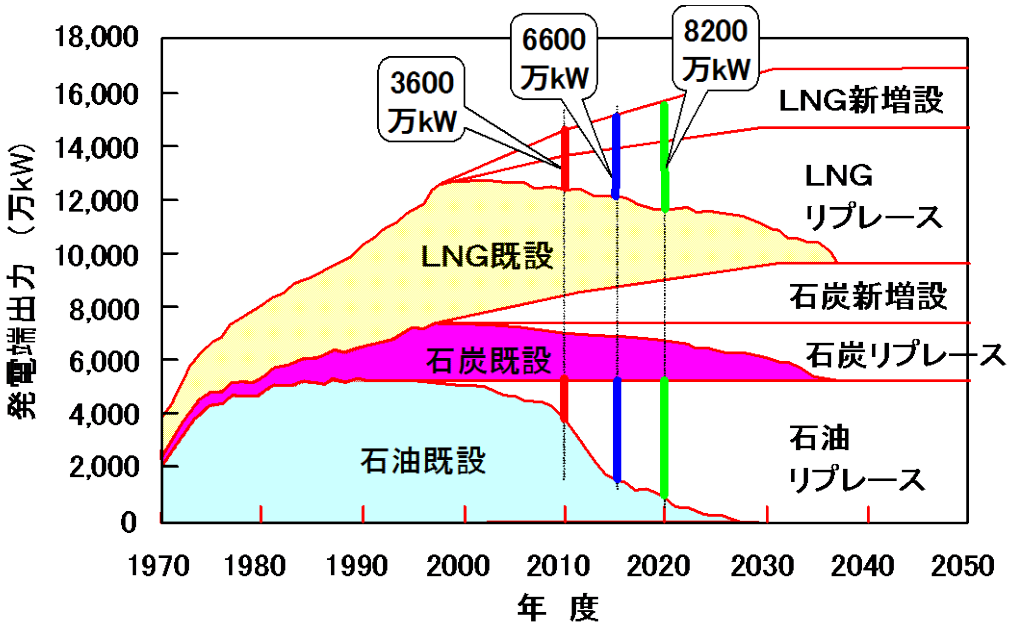


図５－３　わが国における電源構成の推移（プラント寿命 40 年）

出典：電力中央研究所「第 18 回ｴﾈﾙｷﾞｰ未来技術ﾌｫｰﾗﾑ」(1999.11.2)

５－５　変化への対応

（環境問題への対応）

環境問題の高まりにより、温室効果ガスの排出量低減に対する要求が高まっている。このため、風力発電や太陽光発電などの自然エネルギーの普及に拍車がかかっている。天候に左右される自然エネルギーの普及とともに、負荷吸収能力の高い大容量の電源が必要となるが、この点でガスタービンは最適である。また、化石燃料を使用する火力発電についても、より CO2 排出原単位の小さいクリーンな燃料として天然ガスが選択されることが多くなっている。本プロジェクトで開発中の技術により可能となる、超高温高効率ガスタービンを用いたコンバインド発電は、このような市場のニーズ・トレンドに沿っており、有効な技術開発である。

（国内リプレース需要への対応）

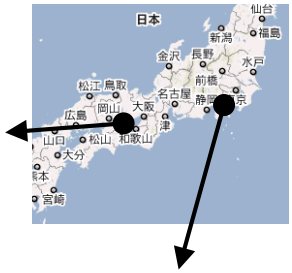
一方、このような環境負荷の小さい発電設備に対する要求と並行して、先進国では導入後 30 年以上を経た老朽火力のリプレース需要が急速に高まりつつある。このような発電設備では、経済性が重要視されるため、発電効率の高い最新鋭のガスタービンを用いたコンバインド発電が選択される場合が多い。このようなニーズにいち早く応えるために、本事業で開発した革新的な要素技術のうち、実機適用可能と判断された技術を活用して、世界初の 1600℃級 J 形ガスタービンを開発し、商用機として実用化した。

関西電力姫路第二発電所（2013年運用開始、292万KW、M501J×6台）

公開された環境アセス資料より抜粋

●最新鋭の1，600℃級ガスタービンを採用した世界最高水準の高効率コンバインドサイクル発電方式に設備更新することで、発電端熱効率（低位発熱量基準※）が約42%から約60%に向上します。

●発電電力量あたりの燃料費とCO2排出量を共に約30%低減することができます。



項　目	現　状	設備更新後
発電方式	汽力発電方式	コンバインドサイクル発電方式
発電所出力	２５５．０万ｋＷ （２５．０万ｋＷ×１基、 ３２．５万ｋＷ×２基、 ４５．０万ｋＷ×１基、 ６０．０万ｋＷ×２基）	２９１．９万ｋＷ（大気温度４℃） （４８．６５万ｋＷ×６基）
使用燃料	天然ガス	天然ガス
発電端熱効率 （低位発熱量基準）	約４２％	約６０％

東京電力

川崎発電所

（2016年度、142万KW、2台）

公開された環境アセス資料より抜粋。

（機種などは未定）

図５－４　1600℃級ガスタービンの高効率を前提とした国内発電設備の計画

（出典：公開された環境アセス資料より）

（急速な円高の影響と対応）

我が国は、徐々にシェアを伸ばしてきたが、2009 年は、リーマンショックの急速な円高のため世界市場で苦戦を強いられた。しかし、国プロで開発した技術を反映した 1,600℃級 J 形ガスタービンの市場投入により 2010 年以降はシェアを伸ばしてきている。

A2. 高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発

１．事業の目的・政策的位置付け

１－１　事業目的

平成２３年３月の東日本大震災の後、原子力発電所の多くが停止されており、我が国の発電電力量の約９割が火力発電によるものとなっている。その発電効率は 40.9%（平成 17 年度一般電気事業者の平均発電端熱効率）と既に世界最高レベルに達している。しかし、資源の乏しい我が国のエネルギーセキュリティーの確保に関する問題及び近年の地球環境問題双方への対応から火力発電所は、環境に配慮した更なる発電効率向上への取組が求められている。

エネルギー資源の中で天然ガスは、東南アジアを中心に世界各国に幅広く分布しており、我が国のエネルギーセキュリティーを確保する上で極めて重要な燃料である。また、他の化石燃料に比べ、燃焼時における二酸化炭素排出量が少ないため、環境負荷の少ないクリーンなエネルギーと言える。そのため、火力発電所における天然ガスの利用拡大を図るため、既設火力発電所に比べて二酸化炭素排出量の削減が多く見込まれる高効率ガスタービンの技術開発を推進していくことが強く求められている。

本事業で研究開発する高湿分空気利用ガスタービンＡＨＡＴ*1（以下、「本技術」）はこのような必要性に応える高効率ガスタービン技術であり、中小容量機（10 万ｋW 程度）の高効率化（45%(HHV)既設複圧 CC*2→51%(HHV)以上）を目標としている。ＡＨＡＴは 1980 年に日本で考案されたＨＡＴ*3 システムが基礎になっており、電力事業用に改良を加えた日本オリジナルの技術である。

世界初となるＡＨＡＴの実用化に必要な技術開発を行い、世界をリードしていくことが本事業の目的である。

*1 アドバンスト高湿分空気利用ガスタービン：Advanced Humid Air Gas Turbine
*2 コンバインドサイクル：Combined Cycle
*3 高湿分空気利用ガスタービン： Humid Air Gas Turbine

１－２　政策的位置付け

平成２０年３月に閣議決定された「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」（経済産業省）において、高効率ガスタービンは、二酸化炭素排出量を抑制できる高効率天然ガス発電であり、「重点的に取り組むべきエネルギー革新技術」の一つとして位置付けられている。また、同計画で示されたロードマップにおいて、AHAT(高湿分空気利用ガスタービン)は、2020 年代に実用化を目指す技術として位置付けられている。

「技術戦略マップ」（平成２２年６月１４日、経済産業省）において、ＡＨＡＴは中小容量機の新設およびリプレースによるエネルギー効率向上できること

から「総合エネルギー効率の向上」、天然ガスの有効利用の観点から「化石燃料の安定供給とクリーン・有効利用」に寄与する技術の一つとして位置付けられている。

さらに、エネルギー基本計画(平成 22 年 6 月 18 日、経済産業省)において、「その他の火力発電については、新増設・更新の際には、原則としてその時点における最先端の効率を有する設備の導入を目指す。」と謳われており、ＡＨＡＴはリプレースにおける中小容量機のエネルギー効率向上に努めることができる技術である。

AHAT と他の発電システムの関連づけとしては、平成 16 年 6 月にとりまとめられた、（財）エネ総工研の「電力分野産業技術戦略」に関わる動向調査報告書において（図１－２）、ＡＨＡＴはガスタービンサイクルを改良したシステムであり、比較的早期に実用化が期待できる高効率発電システムである。また、次世代高効率発電システムである石炭ガス化と組み合わせたＩＧＨＡＴへ展開できる技術であると位置づけられている。

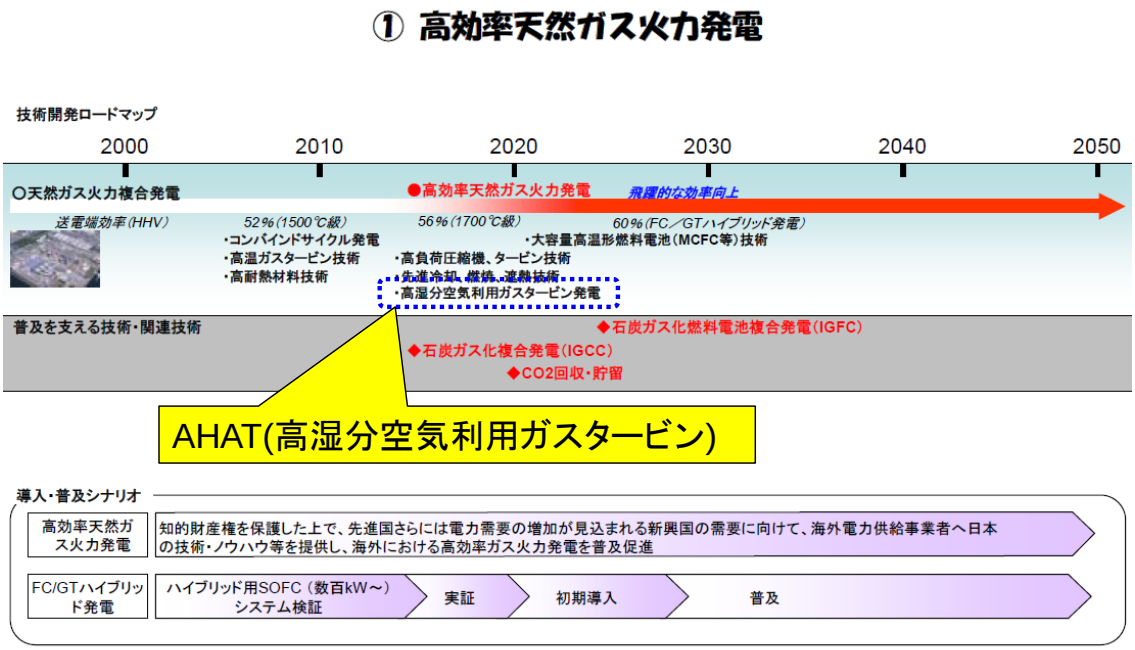
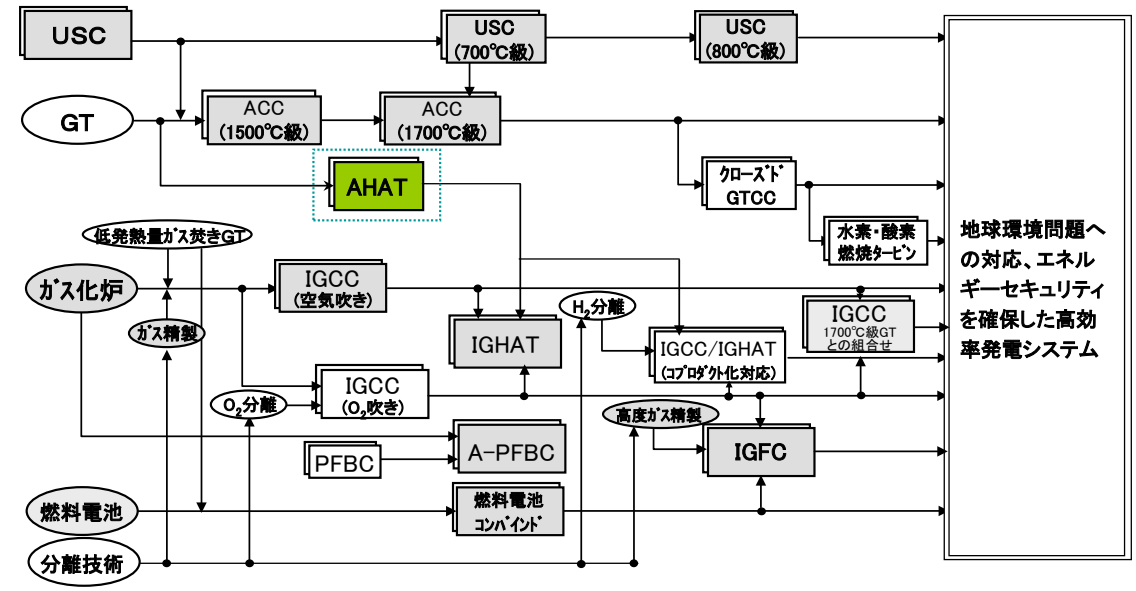


図１－１　「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」(平成２０年３月、経済産業省)におけるロードマップ



出典:「電力分野産業技術戦略」に関わる動向調査報告書　平成16年6月　(財)エネ総工研

図１－２　各種発電システムにおけるＡＨＡＴの位置づけ

１－３　国の関与の必要性

ＡＨＡＴは、世界初、新型ガスタービン発電システムである。増湿装置、再生熱交換器など新たな機器を統合した全体システム特性や、高湿分圧縮機、高湿分燃焼器、高湿分冷却翼などで構成されるＡＨＡＴに適合したガスタービンは、未知なところが多く世界初の難度が高い技術である。民間企業だけでは開発リスクを伴うため、国の関与のもとで実用化技術開発を推進することで民間企業だけでは達成し得ない世界をリードする技術を確立することができる。

本技術を実用化することで、天然ガス利用促進によるエネルギーセキュリティー確保と高効率化によるＣＯ２削減を実現できるため社会的意義が高い。一方で、開発リスクの大きい技術であることから、国の主導・支援による事業とし、民間はそれぞれ優位技術をもつ複数社で構成している。

２　研究開発目標

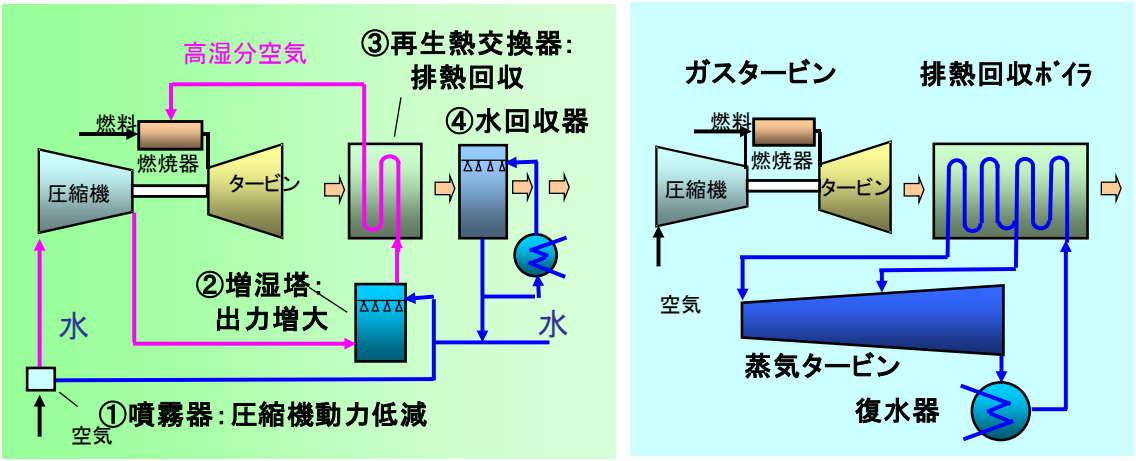
２－１　全体の目標設定

（１）ＡＨＡＴの概要

ＡＨＡＴは、ガスタービン本体の圧力比、燃焼温度の上昇により効率上昇を狙うのではなく、システムの熱回収の工夫により高効率を達成する新型ガスタービン発電システムであり、その概略系統を図２-１左に示す。ガスタービン圧縮機に吸気噴霧システムを採用している。吸気噴霧冷却による吸込み空気量の増加、圧縮機内部で液滴蒸発させることにより圧縮機動力低減の効果を狙って

おり、夏場の出力低下も抑制できる。圧縮機で加圧された空気は、増湿塔にて温水と直接接触することにより蒸気タービン蒸気量に匹敵する量を加湿する。再生熱交換器で熱回収した高湿分空気は燃焼器に供給される。加湿により出力増加し、再生サイクルにより排ガスの熱を回収し熱効率が向上する。高湿分空気はＮＯｘ低減に大きな効果が期待できる。また、排ガス中の湿分と凝縮潜熱の一部を回収して再利用する水回収装置を有しており、水の消費量を抑制している。回収した水は、増湿塔に供給するとともにその一部を冷却して水回収器に再循環させている。

図２-１右に、コンバインドサイクルの概略系統を示す。コンバインドサイクルでは､ガスタービンと蒸気タービンの 2 台で動力を発生し高効率化している。ＡＨＡＴでは①噴霧器、②増湿塔、③再生熱交換器を設置し、ガスタービン 1 台で動力を発生し高効率化を図っている。



AHAT　　コンバインドサイクル

図２－１　ＡＨＡＴおよびコンバインドサイクルの概略系統

図２-２に各種発電システムの出力―効率特性を示す。AHAT は、コンバインドサイクルの蒸気ボイラの構成が複圧程度である～200MW 以下の中小容量クラスで他発電システムよりも高い効率を得ることができる。

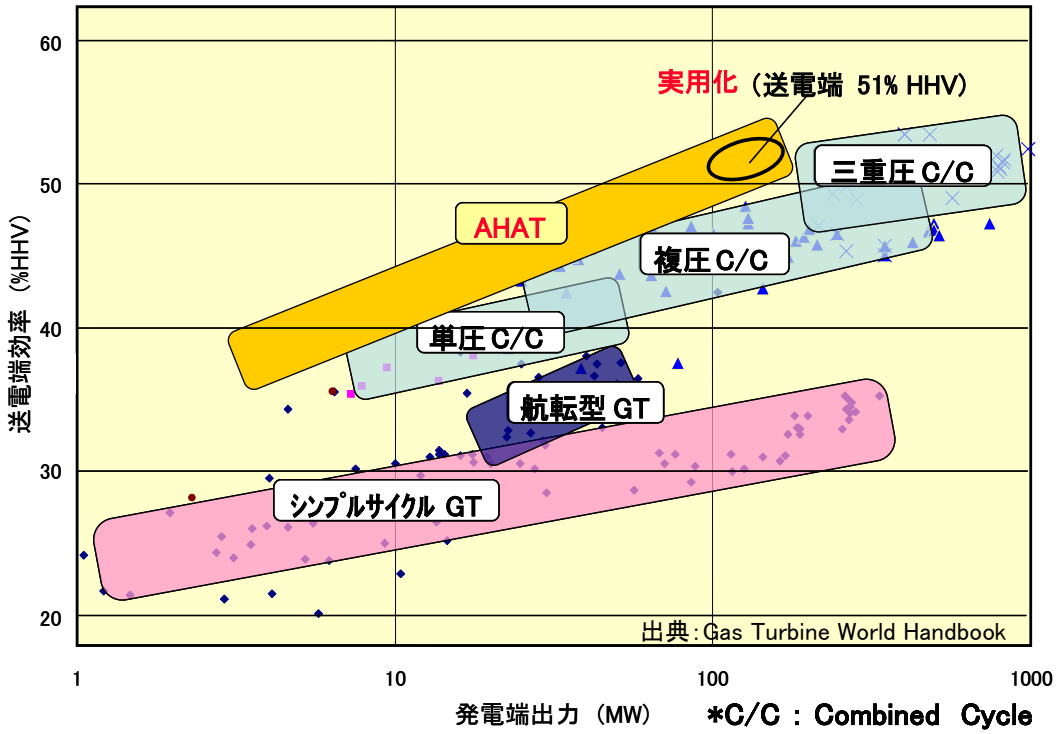


図２－２　各種発電システムの出力―効率特性

表２-１にコンバインドサイクルとの特徴比較を示す。

まず、運用性に関して、蒸気タービンや排熱回収ボイラの暖機運転が不要のため起動時間が短くできる。高湿分燃焼によりＮＯｘ低減できるため、低負荷で加湿開始することで運用負荷帯を広くすることができる。吸気噴霧冷却により高気温時の出力低下を抑制し大気温度特性が改善し、制御もガスタービン制御が主でシンプルである。

環境性については、高湿分燃焼により低 NO x を図り、脱硝のためのアンモニア消費をなくす、もしくは消費を抑制できる。また、ＡＨＡＴは 60℃程度の比較的高い温度の回収水を 30℃程度に冷却するので、冷却方式に空冷のクーリングタワーを使用することができる。コンバインドサイクルでは蒸気タービン出口で 30℃程度と低温であり空冷では設備が大規模になるため、海水を用いた復水器を使用している。AHAT では復水器がないので沿岸でなければならないなどの設置場所の制約がなく、内陸部にも設置可能である。

経済性については、蒸気タービン系統が無いので構成がシンプルで工期も短く、メンテナンス費用も少なくできる。配管、水質管理、ユーティリティ消費がコンバインドサイクルと同等とみなしたとしても、ＡＨＡＴは運用性、環境性、経済性に優れたシステムであるといえる。

表２－１　ＡＨＡＴとコンバインドサイクルとの特徴比較

◎:特に優位　○:優位　－:同等

項目		AHAT		コンバインドサイクル
運用性	起動時間	◎	ST系なく、起動時間短い	ST　HRSG暖機要
	負荷即応性	◎	GT単独運転並み	ベース
	最低負荷	◎	高湿分燃焼により低負荷で運転可能	低NOｘ安定燃焼の制限
	大気温度特性	○	吸気噴霧冷却:高気温時の出力低下小	GTおよびST出力低下
	制御	○	GT 制御が主でシンプル	GT 、ST 制御あり
環境性	NOｘ対策	○	GT:高湿分空気燃焼、GT排気:必要に応じ脱硝装置	GT:低NOx燃焼器、又は、水噴射、又は蒸気噴射、GT排気:脱硝装置
	立地制約	◎	水回収水温60℃程度:冷却塔冷却 内陸部にも設置可能	ST出口温30℃程度:復水器冷却 沿岸(海水への温排水)
経済性	機器構成、工期	◎	ST系なく、構成シンプルで工期も短い	ベース
	配管	－	GT 圧縮機吐出圧力低く、薄肉 ただし、再生サイクル配管径大	HRSG 高圧系圧力高く、肉厚 ただし、主蒸気配管径小
	水質管理	－	水処理装置(イオン交換樹脂等)設置	薬注による　pH 調整
	ユーティリティ消費	－	純水(圧縮機吸気噴霧冷却用),ｱﾝﾓﾆｱ(脱消用)、冷却水(冷却塔補給用)	純水(HRSGﾌﾞﾛｰ補給用)、ｱﾝﾓﾆｱ(脱消用)、冷却水(補給用)
	メンテナンス費用	○	構成機器少ない(排熱回収系、水回収系)	排熱回収系、ST系、復水器系

GT:ガスタービン、ST:蒸気タービン、HRSG:排熱回収ボイラ

（２）開発目標の設定

ＡＨＡＴの最終目標は、天然ガスを燃料とした 10 万ｋW 級中容量高湿分空気利用ガスタービンシステムにおいて、送電端効率 51%、NOｘ排出濃度 10ppm 以下（16%O2）を達成することにある。

これを達成するための本事業におけるＡＨＡＴの研究課題を図２-３に示す。①～④は高湿分空気に関係した実用化技術課題であり、⑤は３MW級検証機を活用して検討を進める課題である。また、⑥にて実用化技術（①～④）を組合せた総合試験装置による機器の相互作用確認し、⑦にてユーザー視点に立ったシステム評価を実施する。

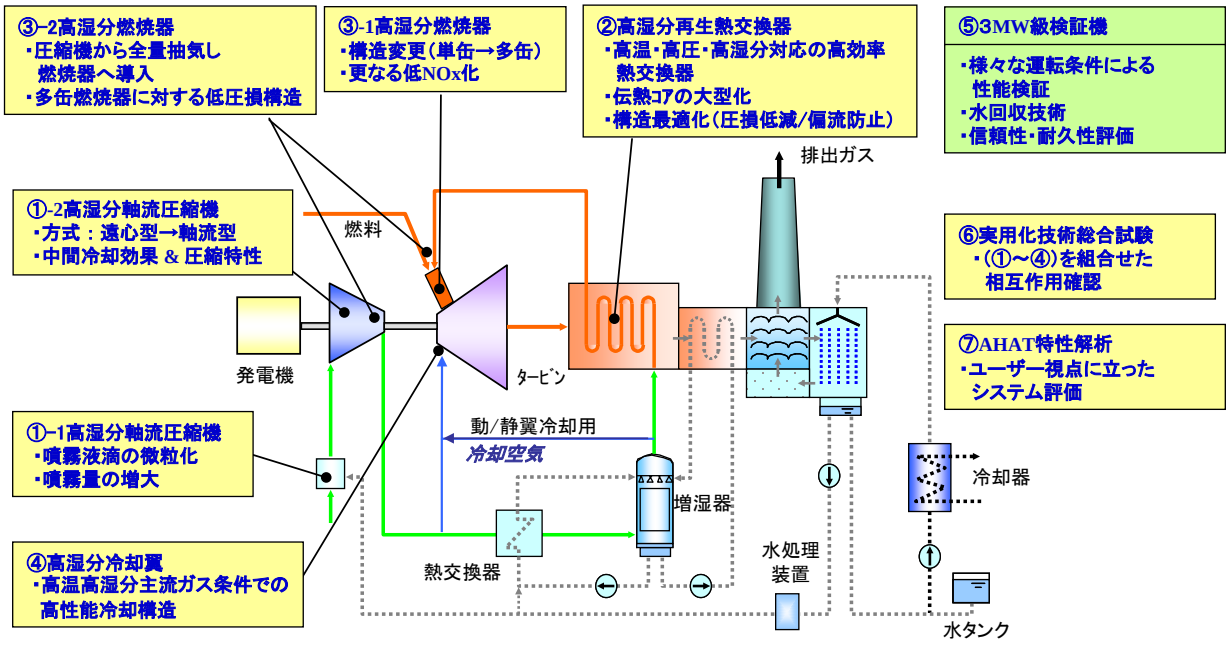


図２-３　ＡＨＡＴの研究課題

最終目標を達成するために開発すべき革新的技術の内容とその具体的数値目標を以下に示す。

①高湿分軸流圧縮機

〇目標値：噴霧量 3.5wt%以上

圧縮機に 2%以上の噴霧をした例は無く、それ以上の量の噴霧では、圧縮機内部での蒸発により中間冷却の効果がえられるが、従来には無い、圧縮機のサージング、圧縮器の翼段毎の負荷分布の変化を考慮した設計が必要となる。また、圧縮器内部で液滴を蒸発促進させるため、液滴微粒化技術も開発する必要がある。

②高湿分再生熱交換器

〇目標値：温度効率 90%以上、伝熱面密度 1000m2/m3　以上

再生熱交換器には、高温、高圧かつ高湿度の環境で、ガスタービンの起動停止、負荷変動に伴う温度・応力が変動する条件で充分な耐久性と高い温度効率が必要。小型ガスタービンでは実用化されているが、それ以上のサイズでは実用化の例は僅かで(軍事用 WR-21(約 20MW)が最大)、更なる大容量にむけては伝熱面密度を上げ、コンパクトにする必要がある。高温、高圧かつ高湿度条件下で、充分な耐久性を持つ再生熱交換器を開発する必要がある。

③高湿分多缶燃焼器

〇目標値： NOx 10ppm 以下

再生熱交換器の作用により、燃焼用空気が高温となる条件下では、燃焼器内の空間的温度分布が高温となり、低 NO x 化が難しくなる。さらに、高湿分空気の燃焼では、湿分の影響により、着火性、燃焼安定性の確保が難しくなる。高温、高湿分条件下で、燃焼安定性と低 NO x 化を両立する高湿分多缶燃焼器を開発する必要がある。

④高湿分冷却翼の開発

〇目標値：冷却効率静翼：70%以上、動翼：60%以上

AHAT では、タービンの作動流体である主流ガスが約 20～25vol%の湿分を含んでおり、タービン翼との熱伝達率が大きいことと、比熱比γが小さいことからタービン排ガス温度が従来ガスタービンよりも高温となる傾向がある。そのようにタービン翼の熱負荷が大きい状況で、冷却空気の使用量を低減するために増湿塔出口の低温の高湿分空気を用い、必要な温度まで翼材料を冷却する高湿分冷却翼の開発する必要がある。

⑤３MW 級検証機

〇目標：プラント側の特性把握

３MW 機試験を実施し、AHAT システム特性、機器の性能向上、主要機器の経年変化を確認する。

⑥実用化技術総合試験装置

〇目標：発電用ベビーデューティーガスタービンに AHAT を適用

開発した要素技術を組合せ、高圧、高湿分環境における高湿分軸流圧縮機、高湿分再生熱交換器、高湿分多缶燃焼器、高湿分冷却翼の相互作用を確認する。

⑦AHAT 特性解析

〇目標：ユーザ視点からのシステム評価

開発側のみならず、ユーザの視点に立って客観的に特性を評価する。

これらをまとめたものを表２-２ に示す。

表２－２　ＡＨＡＴの研究目標・指標

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
①高湿分 軸流圧縮機	・吸気噴霧量：3.5%以上	圧縮機内部での水滴蒸発効果を積極的に活用できる噴霧量を設定した。
②高湿分 再生熱交換器	・温度効率：90%以上 ・伝熱面密度：1000m2/m3以上	熱交換器のコアの大型化（コスト）と性能を勘案して設定した。温度効率90%は高温で作動する再生器にとって極めて高い値に相当する。
③高湿分 多缶燃焼器	・NOx：10ppm以下	高湿分空気による燃焼では燃焼の不安定化が懸念される、低NOxと燃焼安定性の両立を勘案し設定した。
④高湿分 冷却翼	・冷却効率　静翼：70%以上 動翼：60%以上	高湿分により主流ガス側の熱伝達率が大きくなり熱負荷が増大することを勘案し設定した。
⑤3MW級 検証機	・AHATプラント側の特性把握	3MW機試験を実施し、AHATシステム特性、機器性能の向上、主要機器の経時変化を確認する。
⑥実用化技術 総合試験	・発電用ヘビーデューティー ガスタービンにAHATを適用	開発した要素技術を組合せ、高圧、高湿分環境における高湿分軸流圧縮機、高湿分再生熱交換器、高湿分多缶燃焼器、高湿分冷却翼の相互作用を確認する。
⑦AHAT特性 解析	・ユーザ視点からの システム評価	技術開発においては、開発側のみならず、ユーザの視点に立って客観的に特性を評価することが重要。

３　成果、目標の達成度

３－１　成果

３－１－１　全体成果

3MW級検証試験および3MW級検証機評価は、平成21年度で完了している。3MW級検証機では大気温度特性、起動、部分負荷性能、水回収性能などの運転特性を取得し性能評価した。また耐久性、信頼性にかかわる機器の経時変化を取得し、試験期間中、正常な状態を維持できていることを確認した。

技術開発要素である高湿分圧縮機、高湿分再生熱交換器、高湿分多缶燃焼器、高湿分翼冷却についてはそれぞれの目標を達成し、平成22年度に完了した。

実用化技術総合試験は、平成24年1月から運転開始し、平成24年2月に50%負荷まで到達した。吸気噴霧冷却、加湿管、再生熱交換器、高湿分冷却翼など要素機器の相互作用と性能を確認するとともに、定格出力に到達するための課題を摘出した。

３－１－２　個別要素技術成果

（１）高湿分圧縮機（図３－１-A 参照）

軸流圧縮機噴霧冷却性能予測アルゴリズムとタービン性能予測アルゴリズムを連携させたガスタービンヒートバランス予測ツールを開発し、実用化技術総合試験装置設計に適用した。吸気部の蒸発や圧縮機内での液滴の捕集、および液滴径分布（多分散性）を考慮したモデルをアルゴリズムに組み込むことで高度化し、より詳細な圧縮機内部蒸発特性の予測を可能にした。

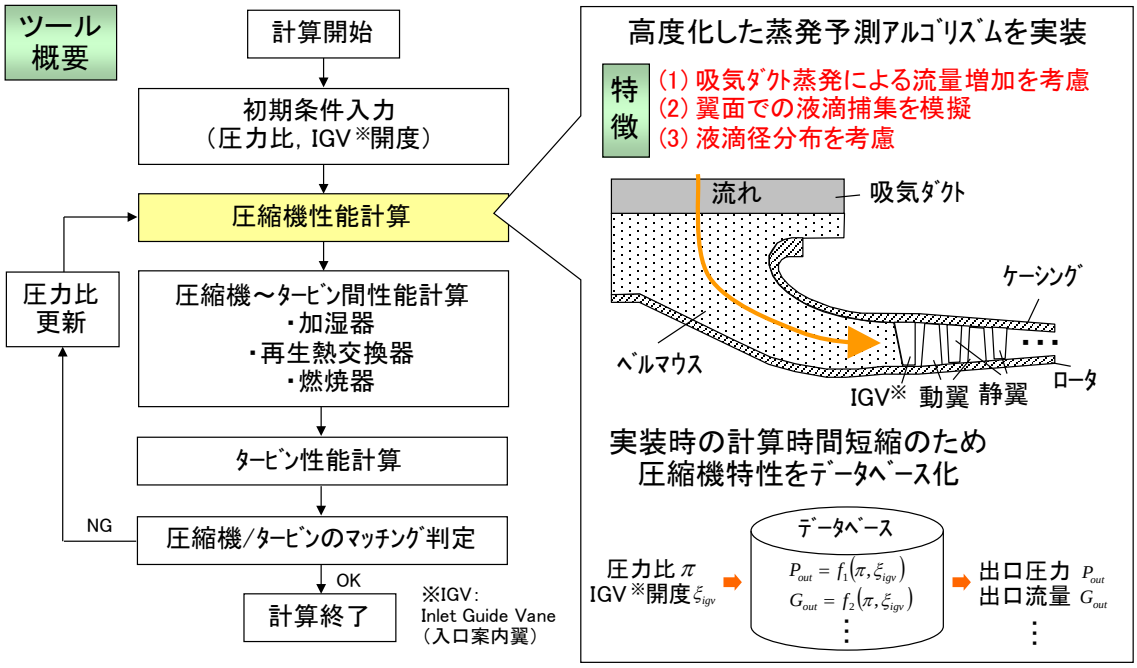


図３－１－A　高湿分圧縮機評価モデルの高度化

開発した性能予測手法は、40MW 級総合試験装置の高湿分軸流圧縮機を設計に用いられた。性能予測結果から、吸気噴霧時には液滴蒸発によって圧縮機内部の負荷分布が変化し、圧縮機後段負荷が増加する傾向にあることが明らかになった。このため通常の圧縮機に比べて、蒸発完了段より後段側の静翼の取付角（スタッガ角）を 1deg から 4deg 増加させて後段の翼負荷を減少させることで、信頼性を確保することとした。

平成 23 年度には、40MW 級総合試験装置を用いた吸気噴霧試験を合計 4 回実施した。試験では最大 1.7%（吸込空気質量比）の噴霧を実施し、冬季の特性データを取得した。試験結果（表３－１-B、図３－１-C、図３－１-D）から、噴霧時は液滴蒸発によって圧縮機入口および出口温度が低下し、圧力比や流量の増加、および圧縮動力低減といった性能向上効果が得られることを確認した。さらに、開発した性能予測手法の妥当性も確認された。

さらに性能予測手法を用いて計画噴霧量（3.5%（吸込空気質量比））の性能予

測を実施した。性能予測結果（図３－１-E）から、3.5%噴霧時でも噴霧液滴は全量蒸発し、翼負荷等の信頼性に問題がないことを確認した。

表３－１－B　PHASE Ⅱ 試験結果

項目	単位	内容
噴霧量	wt%	1.7
吸気温度低下量	℃	1.6
出口温度低下量	℃	36.7
吸込流量（DRY比）	－	1.018
圧力比（DRY比）	－	1.011
単位流量当たりの圧縮動力（DRY比）	－	0.970

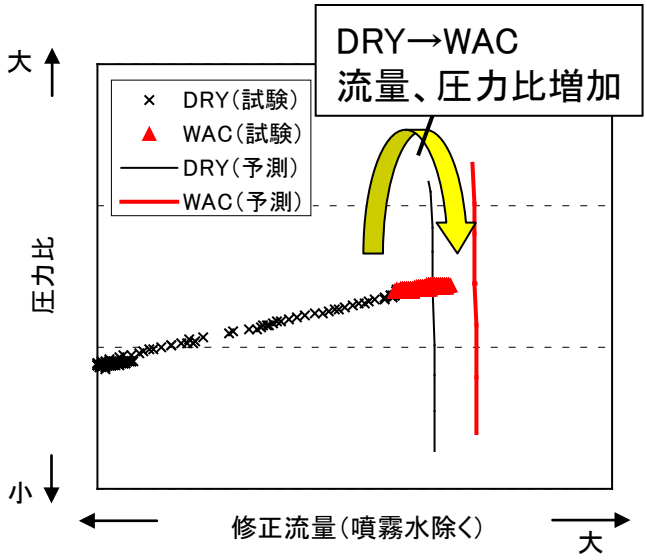


図３－１－C　圧縮機特性

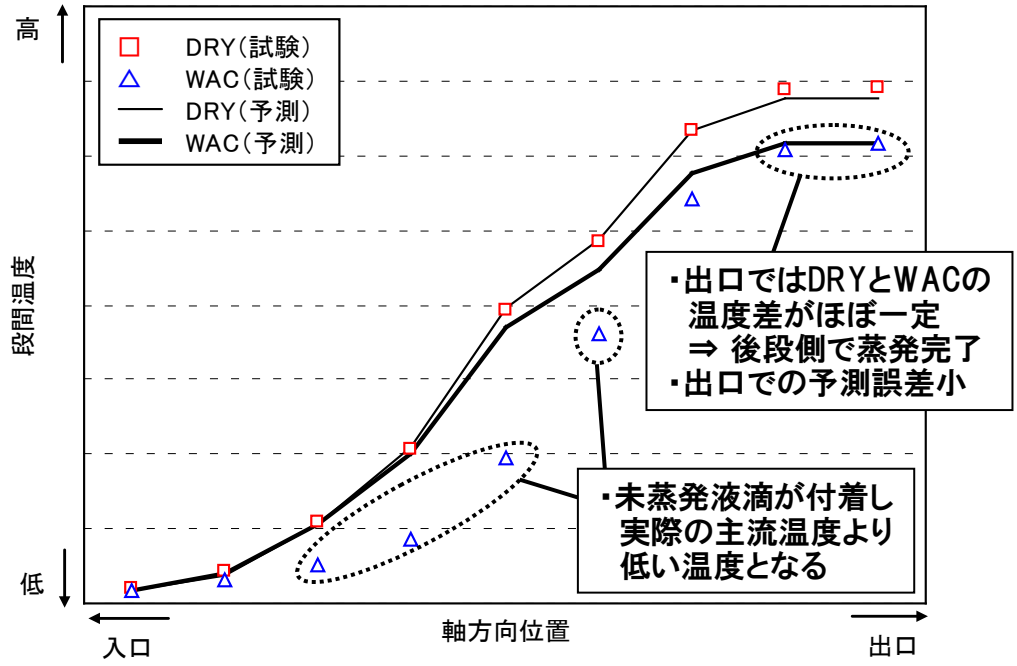


図３－１－D　段間温度分布

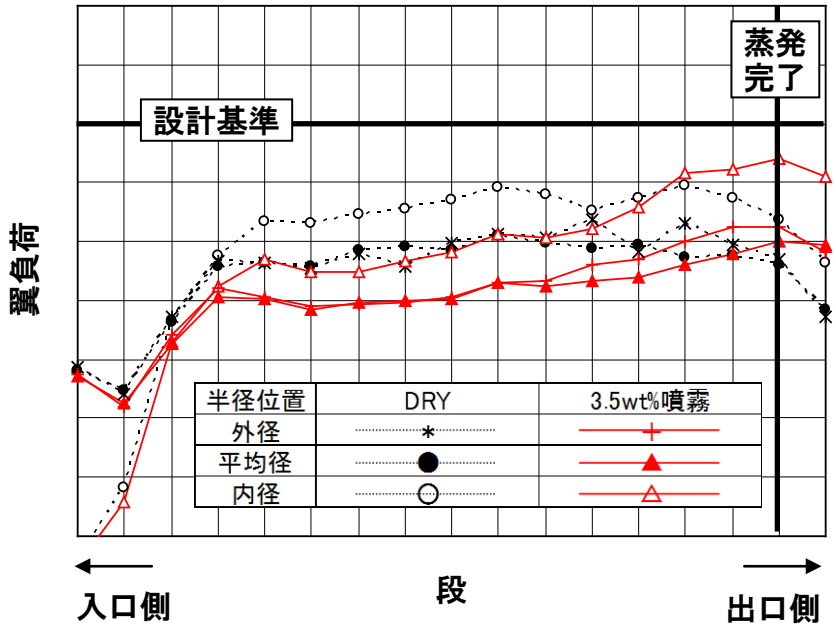


図３－１－E　3.5%噴霧時の圧縮機動翼負荷分布

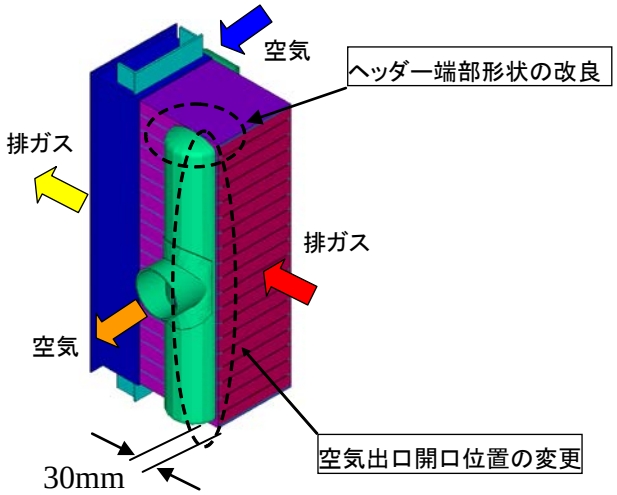
（２）高湿分再生熱交換器

熱交換器本体のヘッダータンク形状の改良、流路構成の見直しにより、タービンの起動停止時に発生する熱応力を低減して 3MW 級 AHAT システム用に開発した熱交換器本体から耐久性を約 20 倍高くなることを FEM による構造解析により確認した。しかし、商用機の仕様には 3MW 級 AHAT システムで使用した高性能フィンでは耐圧強度が不足するため、耐圧強度が高く、かつ伝熱面密度の減少も約 10%と最小限とした肉厚高密度な新型高性能フィンを新たに開発した。

設計した熱交換器本体は、伝熱部フィンに燃焼排ガス側はパーフォレート型、圧縮空気側には新規開発したマルチエントリー（セレート）型を選定して高効率かつコンパクトな構成とした。その結果、伝熱面密度は約 1160m^2/m^3 となり、開発目標値である 1000m2/m3 以上の伝熱面密度を達成した。更に熱交換器本体を約 70%大型化して熱交換器本体の数を最小とした。

再生熱交換器は、熱交換器本体部分を 10 基のブロックに分割して、ブロック 2 基を 1 つのモジュールとする、モジュール構造を採用した。合計 5 基のモジュールには、燃焼排ガス側はダクト、圧縮空気側は配管により分流される。

材料は高性能かつ低コスト、耐水蒸気酸化性を考慮してステンレスを選定して、薄肉であるフィンおよびセパレートプレートには、NAR-AH-7 と同等の高温強度ながらコスト的に優れた UNS S31060 を選定した。



再生熱交換器本体の改良

1000m2/m3 以上の伝熱面密度を達成
（両伝熱面合計：1160m2/m3）

再生熱交換器本体

再生熱交換器モジュール

図３－２－A　再生熱交換器本体、モジュール

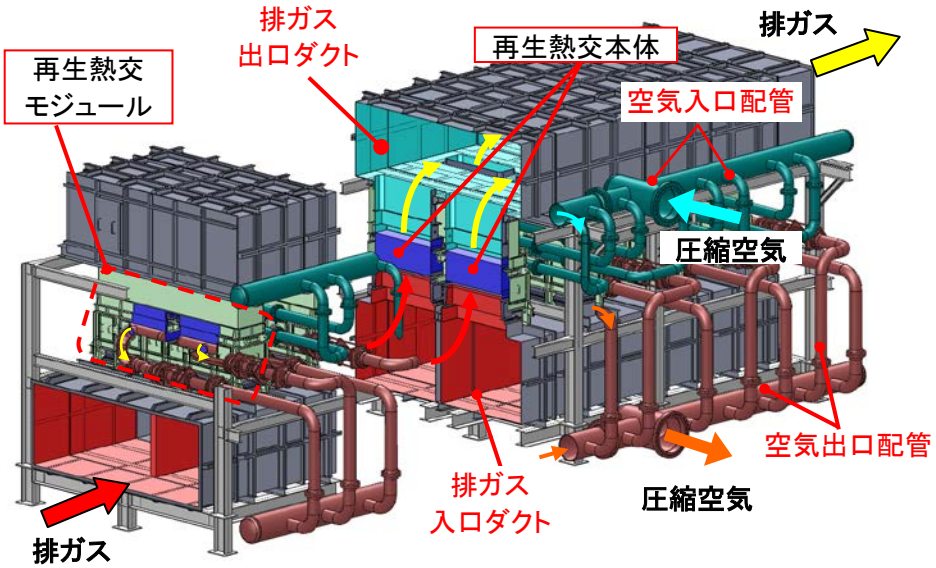


図３－２－B　再生熱交換器ユニットの空気およびガスフロー

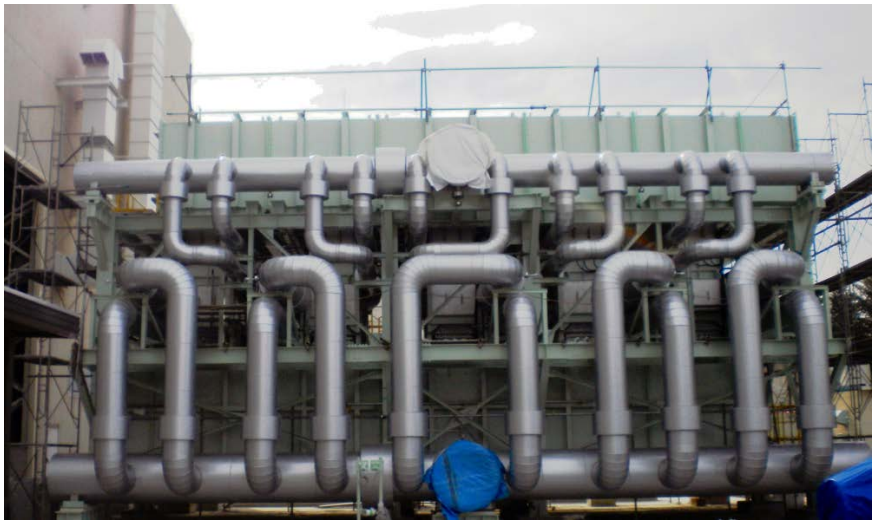


図３－２－C　再生熱交換器ユニット外観写真

総合試験装置による運転試験評価は、2012 年 3 月 8 日にガスタービン負荷 20MW での運転試験において、静定状態となった計測値で性能評価を行った。

空気通路側の温度効率は 91.3%、圧力損失はいずれも仕様値以下の性能を達成することを確認した。また、その際の各ブロック間の温度分布は、燃焼排ガス側入口約 2℃/出口 11℃、圧縮空気入口約 2℃／出口 5℃であった。ブロック間での温度の偏差が小さいことから、偏流などの事象は発生していないと考えられる。特に空気出口温度の偏差が小さく、圧縮空気側の温度効率向上に寄与している。

表３－１　総合試験計測結果

項　目		仕様値	測定値
燃焼排ガス温度	℃	入口：539.4 出口：301.8	入口：443.16 出口：292.01
圧縮空気温度	℃	入口：148.9 出口：471.3	入口：160.76 出口：418.58
温度効率　ηc	%	82.5	91.3
燃焼排ガス圧力損失	kPa	9.8	5.0
圧縮空気圧力損失	kPa	45.0	16.1

計測日時：2012.3.08　15:45

$\eta c = (Tco-Tci) / (Thi-Tci)$

Tci：圧縮空気入口温度、Tco：圧縮空気出口温度

Thi：燃焼排ガス入口温度、ηc：温度効率（圧縮空気側）

（３）高湿分多缶燃焼器

（３－１）負荷運転特性（湿分による NOx 低減効果）

図 3-3-A に総合試験の加湿時における NOx 排出量の推移を示す。11 時からの加湿管や WAC での加湿により，NOx 排出量が減少していることが分かる。その後，16 時まで約 3 時間のヒートランを実施したのち，17 時前に加湿水の噴霧圧力を増加させることで加湿量をさらに増加させたところ，NOx 排出量は最小 10.3ppm まで低減でき，AHAT システムの加湿による NOx 低減効果を確認できた。

次に， NOx に対する湿分の影響を図３－３-B に示す。ここで湿分は，総合試験機の加湿器における飽和条件に相当する湿分で規格化している。▲は２２年度の単缶要素燃焼試験の結果を，また今回の総合試験機の NOx 特性を〇で示す。いずれも負荷 20MW 一定条件のデータである。総合試験機においても要素燃焼試験の場合と同様，NOx 値は湿分によって影響を受けるが，今回の最大加湿条件で 10.3ppm となり，湿分が飽和条件となるフル AHAT システムの増湿塔方式では，目標としている 10ppm 以下を達成できる見通しを確認した。

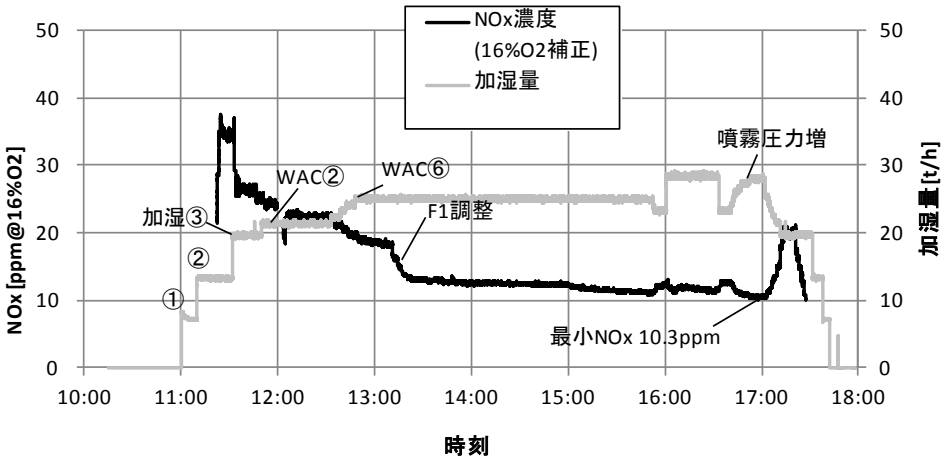


図３－３－A　加湿量と NOx 排出量

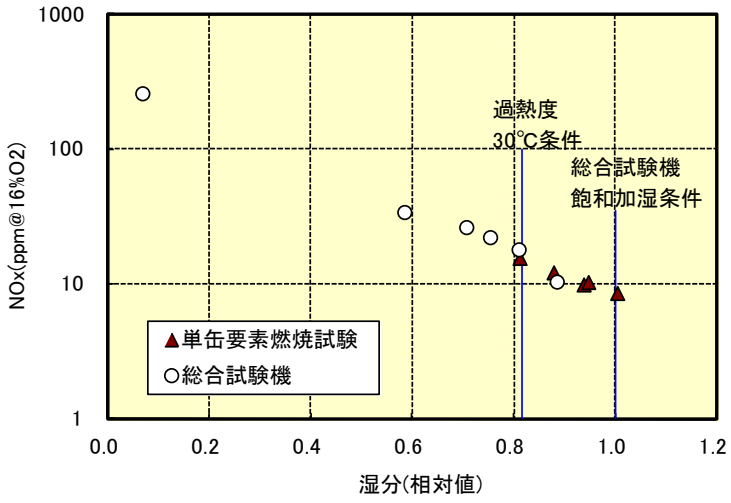


図３－３－B　NOx に対する湿分の影響

（３-２）湿分を考慮した安定燃焼制御

図３-３-C の左の図は加湿管での加湿を開始した直後の燃料比率の変化を示す。加湿操作と同じタイミングで安定燃焼維持に重要な F1 燃料の比率がステップに上昇している。また同じ図に燃焼制御指令の変化も合わせて示す。燃焼制御指令は，燃料系統の切替えを判断するための物理量であり，燃焼空気湿度の影響も考慮している。すなわち，同じ燃料流量，燃焼空気流量において燃焼空気湿度が高くなると，燃焼制御指令は低下する仕組みである。加湿操作後に燃焼制御指令が 2 段階で低下している。まず，燃焼空気湿度の上昇によって，演算に組み込まれたロジックに沿って燃焼制御指令が低下する。その後，燃焼空気湿度の上昇によって作動流体の密度が大きくなって出力が増加するため，実際の燃料流量が減少して燃焼制御指令が低下する。このように，加湿による出力増加は遅れ時間を持つ。図３-３-C の右の図は WAC 時の燃料比率の変化を示す。加湿管での加湿量変化と同じく，WAC 噴霧量の増加に対して F1 比率が増加する。また，燃焼制御指令は，WAC によって燃焼空気湿度が高くなるため，低下する。そして，圧縮機吸気量が増加するため，出力が増加して燃料流量が減少して燃焼制御指令はさらに低下する。

今回の総合試験機では，加湿による燃焼安定性の変化を考慮して，常に安定な火炎を維持するために，湿分を考慮した燃焼制御指令を考案して制御装置に組み込んだ。上記の検討結果から，制御装置での加湿量の推算が計画通りできていることが確認できた。また，湿分の変化に追従して燃料配分を制御した結果，加湿時，燃料切替え時にも燃焼安定性が確保できることを確認し，湿分を考慮した燃焼制御指令を用いた AHAT 高湿分燃焼器制御の有効性が実証できた。

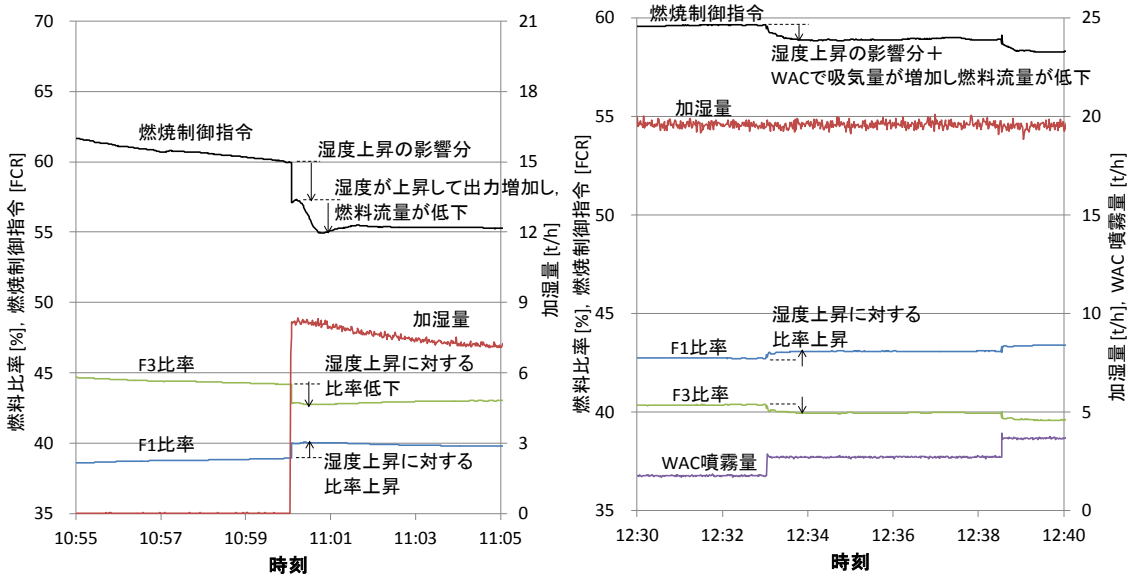
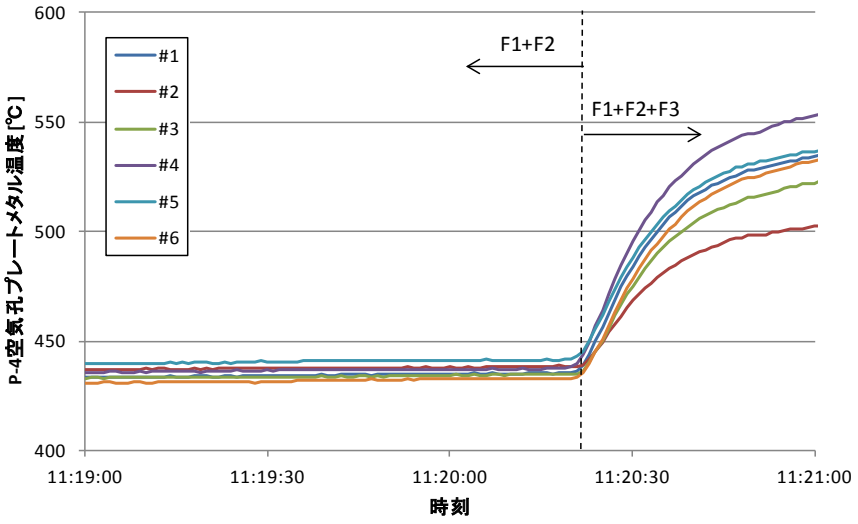


図３－３－C　加湿管加湿時（左）と WAC 時（右）における
加湿量，燃料制御指令，燃料比率のトレンド

（３-３）多缶燃焼器の均一性

AHAT 多缶燃焼器構造の成立性を確認するため，負荷試験において，F3 バーナの点消火の遅れ時間を検討した。図３-３-D は６缶の燃焼器それぞれに設置した空気孔プレートメタル温度計測値のトレンドを示す。F3 バーナに点火すると，空気孔プレートメタル温度が上昇するため，各缶の温度変化のタイミングから F3 点消火遅れが判断できる。図から，11:20:20 頃において全缶のメタル温度が同時に上昇，また 17:26:30 頃において全缶同時に低下しており，缶毎の切替え遅れは小さいことを確認した。また，メタル温度のバラつきは，点火前で約 15℃，点火後で約 50℃であり，実用上は問題ないバラつきと考える。

以上から，F3 バーナ点火時，消火時ともに缶毎の遅れ時間は十分小さく，AHAT の圧縮空気の抽気構造、加湿・再生後の圧縮空気の注入構造に起因する多缶燃焼器各缶の空気流量偏差が十分小さいことが確認できた。



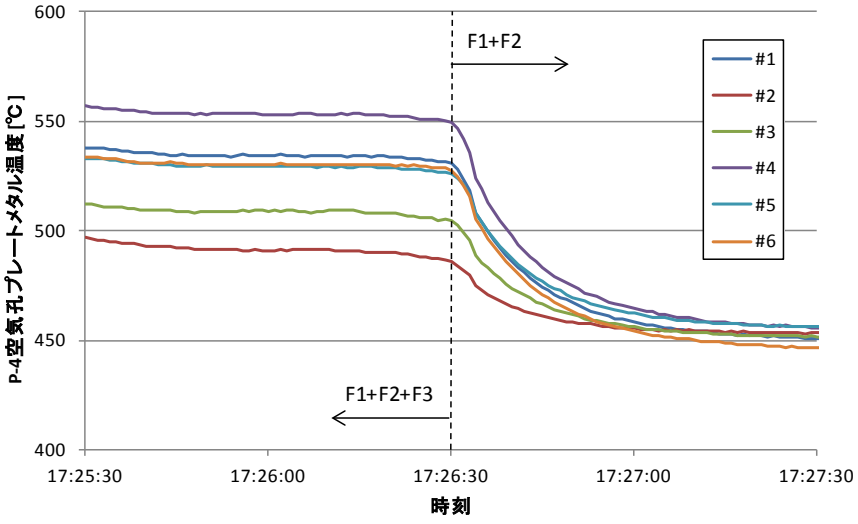


図 3-3-D F3 点火(上図)消火時(下図)の空気孔プレートメタル温度の変化

（４）高湿分冷却翼

AHAT システムでは、乾燥空気を使用した燃焼ガスと比べて水蒸気濃度が高いので、タービン翼の主流側の熱伝達率が増加し、翼の受ける熱負荷が高くなる。冷却空気量の増加を抑制するために、サイクルの利点を生かして増湿系統から抽気した低温の高湿分空気を併用して冷却するハイブリット冷却翼を設計・製作し、冷媒供給系統とともに総合試験装置に組み込んで冷却効率を確認した。

図３－４-A にハイブリッド冷却翼の組込状況と断面図を示す。ハイブリッド冷却方式の効果を通常冷却翼と比較するため、ハイブリッド冷却翼は第１段静翼の 2 セグメント（1 セグメントは翼 2 枚）を製作した。ハイブリッド冷却翼のみに高湿分空気を選択的に供給するため、ハイブリッドカバーを設置した。またハイブリッド冷却翼の第２、第３冷却流路に高湿分空気を使用する構造を採用し、熱応力を緩和している。

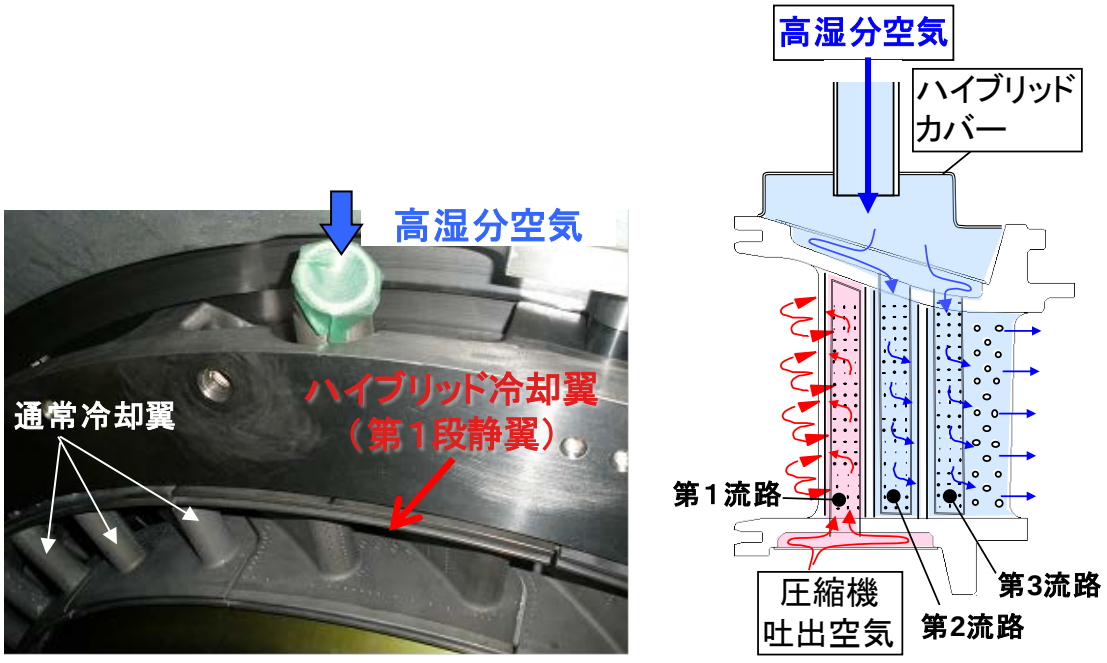


図３－４－A　ハイブリッド冷却翼組込状況と断面図

図３－４-Bに、加湿・WAC有り試験におけるハイブリッド冷却翼のメタル温度実測値と、冷却性能評価ツールによる予測値を示す。メタル温度実測値は、腹側ではおおむね予測値に一致し、背側では予測値を下回った。以上の結果より、ハイブリッド冷却翼は高湿分運転時において計画通りの冷却性能を達成していることを確認した。

図３－４-Cに、加湿・WAC有り試験におけるハイブリッド冷却翼の冷却効率を示す。横軸の冷却空気量は、通常冷却翼の冷却空気流量に対するハイブリッド

冷却翼の冷却空気流量の相対値である。この結果より、通常冷却翼よりも少ない冷却空気量で、目標としていた冷却効率70%以上達成できることを確認した。

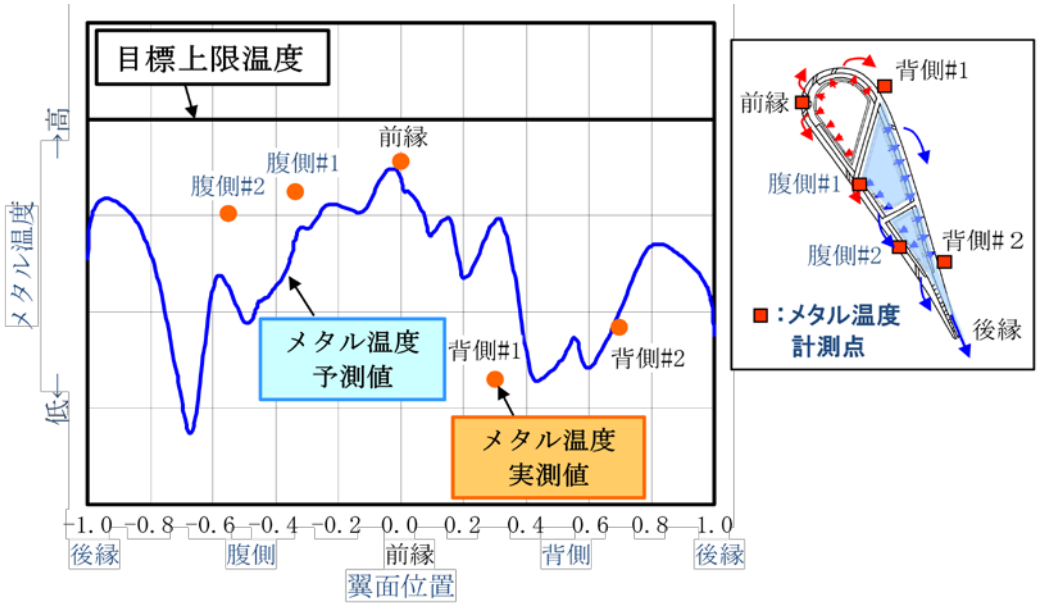


図３－４－B　ハイブリッド冷却翼のメタル温度実測値と予測値の比較

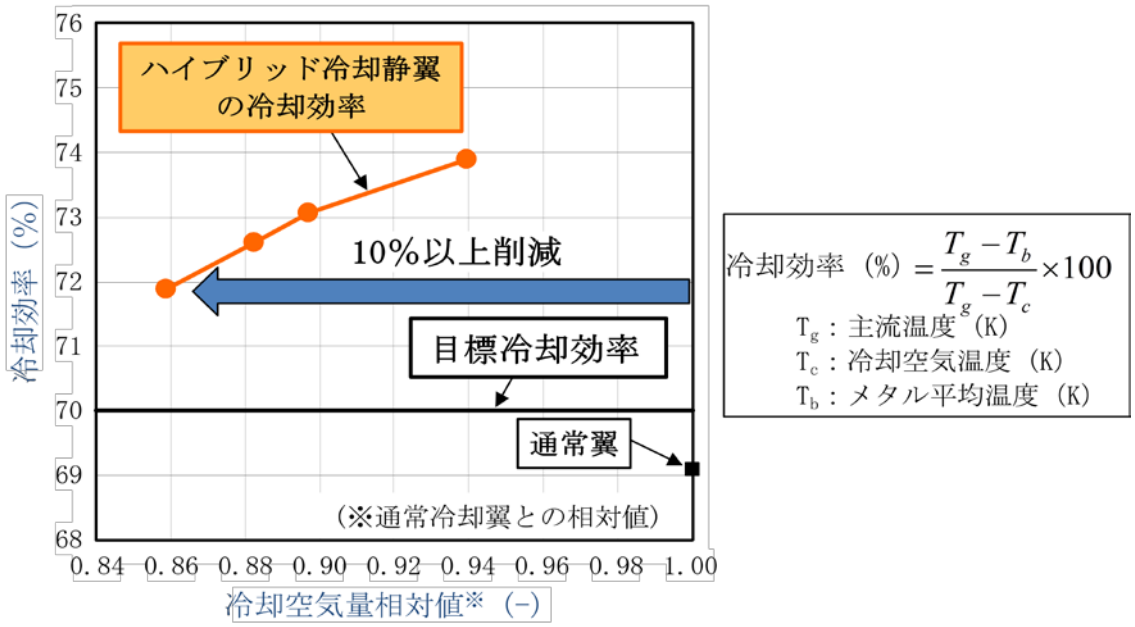


図３－４－C　ハイブリッド冷却翼の冷却効率

（５） ３MW検証機試験、ＡＨＡＴ特性解析

2004 年度から 2006 年度にかけて実施した要素技術開発では、図３−５−A に示す 3MW級検証機にて定格出力 3600ｋW以上の 3990ｋWを達成し、ＡＨＡＴシステムの成立性を確認した。本事業では、3MW級検証機を活用してシステム特性、機器性能の向上、主要機器の経時変化を確認した。

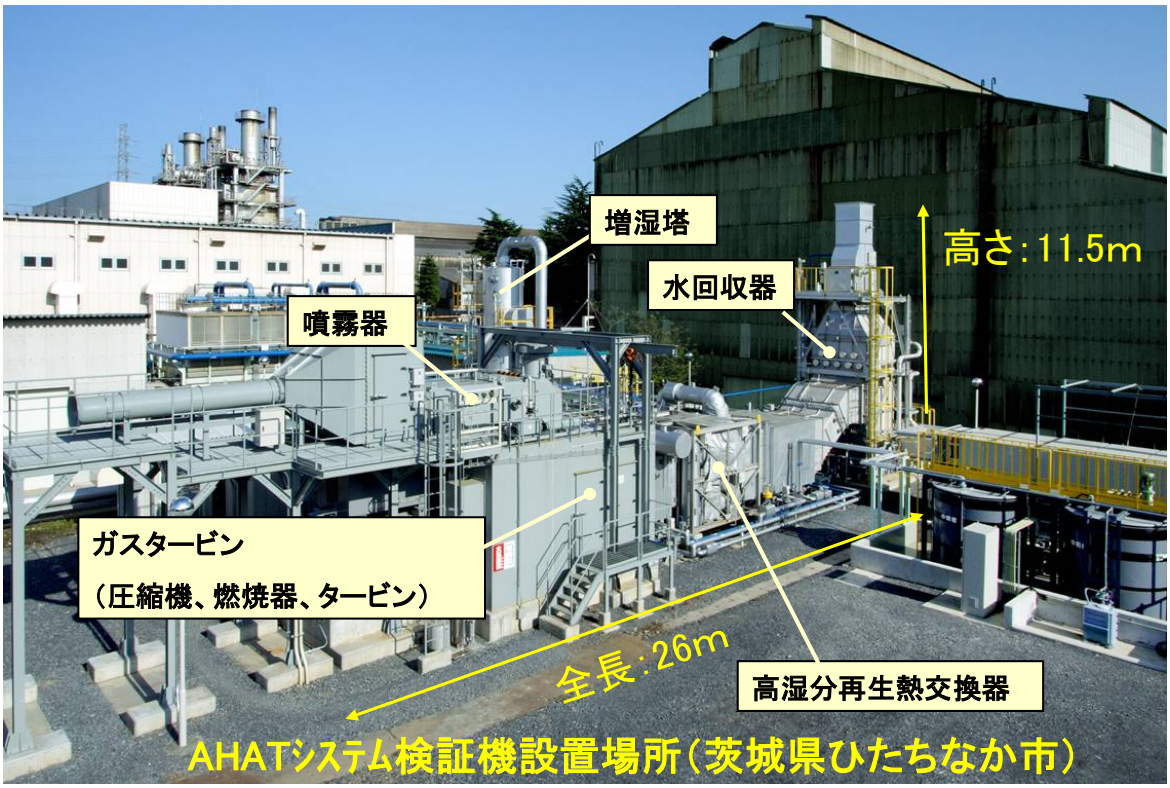


図３－５－A　３MW級システム検証機

（５－１）大気温度特性

大気温度特性を図３－５-B に示す。システムヒートバランス計算で求めた大気温度特性(実線：予測値)を併記している。出力、効率ともに、ヒートバランス計算による結果と同様な傾向を示し、気温が低いほど高出力、高効率になっている。

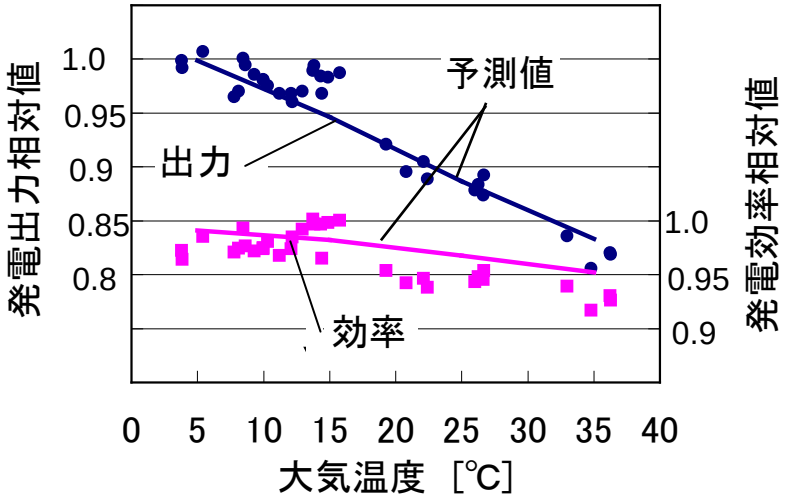


図３－５－B　大気温度特性

（５－２）起動時間

図３－５-C に、完全停止状態からコールド起動したときのタービン入口温度、発電端出力、加湿量、給水加熱器入口ガス温度変化を示す。約 60 分で定格出力に達している。再生熱交換器や給水加熱器などの各機器熱容量により給水温度上昇、加湿量に遅れが生じることが負荷上昇の制約になることがわかった。

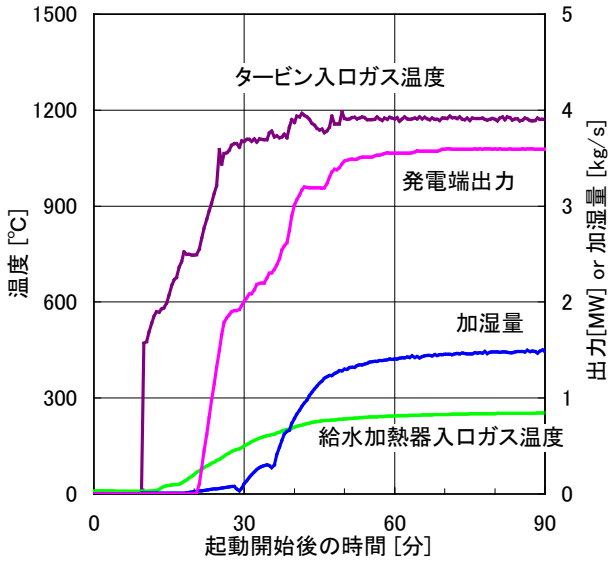


図３－５－C　コールド起動特性

（５-３）水回収器での水回収性能

図３-５-D に水回収器断面を示す。スプレイ液滴による気液直接接触で排ガス中の湿分を凝縮させ水分を回収している。図３-５-E に水回収量を示す。液滴空間分布の均一化を目的に、スプレイノズル配置を工夫することにより回収率が改善されている（WR9、WR10）。これにより、増湿塔での加湿量はほぼ全量回収可能となった。

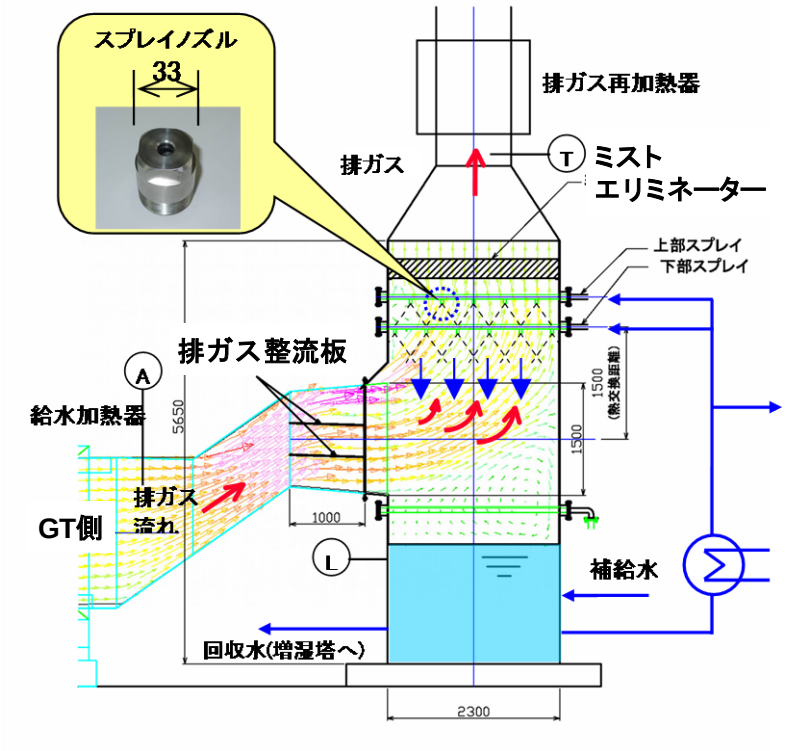
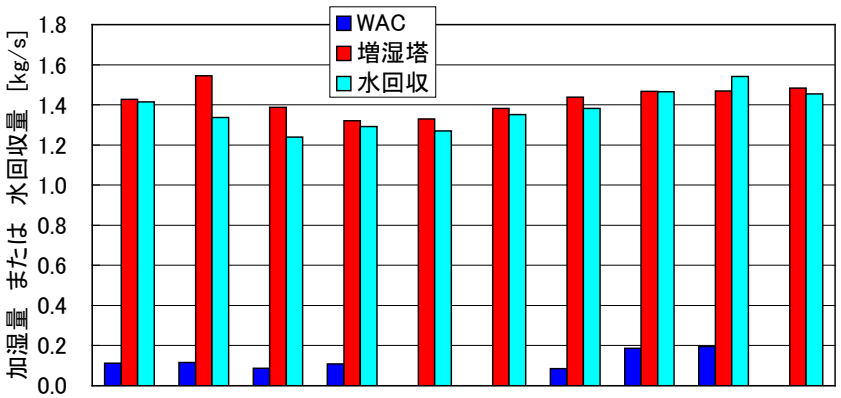


図３－５－D　水回収器



試験ケース名		WR1	WR2	WR3	WR4	WR5	WR6	WR7	WR8	WR9	WR10
機器状態	排ガス整流板	従来		GT側に100mm移動							
	スプレイノズル	従来			微細化			分布均等Ⅰ		分布均等Ⅱ	
	ミストエリミネーター	従来					微細化				

図３－５－E　水回収器での回収量

（５－５）機器の経時変化（図３－５-F）

ＡＨＡＴサイクルの主要機器で、起動停止時に発生する熱応力に対する信頼性確保が要求される再生熱交換器について、各試験の温度効率、圧力損失をプロットした。運転試験の間、熱交換性能および圧力損失の経年劣化は特になく、温度効率 90%以上、許容圧損以下で、維持正常な状態を維持できていることを確認した。

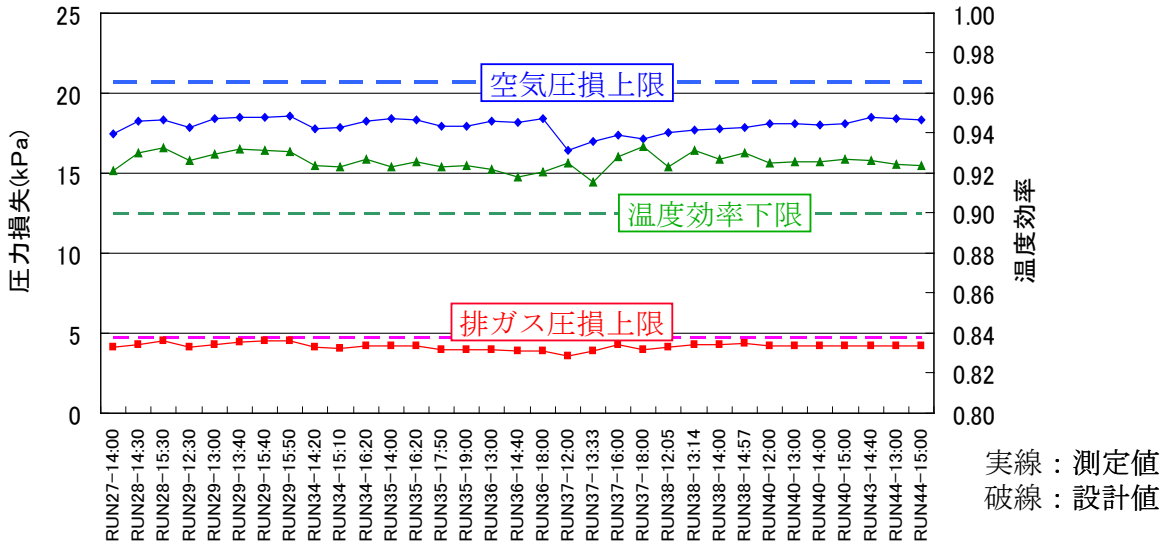


図３－５－F　再生熱交換器の温度効率、圧力損失変化

（６）実用化技術総合試験

高圧・高湿分環境における、高湿分軸流圧縮機、高湿分再生熱交換器、高湿分多缶燃焼器、高湿分冷却翼の相互作用を確認するために 40MW級総合試験装置を設計、製作した。系統構成と検証項目を図３-６-A に示す。この試験装置はＡＨＡＴをヘビーデューティー型ガスタービンに適用するための技術開発であり、増湿装置は部分加湿の加湿管、水回収器は非設置とするなど、プラント機器構成を簡略化している。本装置は試験装置であるため、ガスタービンで得られる動力は発電して系統につなげることはせず、動力を負荷圧縮機で吸収することにしている。

本試験は、２０１２/１に運転開始し、２０１２/２に、50%負荷である 20MW まで到達した。２０１２/３まで、29 回の起動、累計 65 時間運転し、吸気噴霧冷却、加湿管、再生熱交換器、高湿分冷却翼など、運転動作確認した。図３-６-B に、運転曲線の例を示す。負荷を一定に保持し、燃焼器の調整により NOx 濃度 10ppm 以下を確認した。

定格負荷での運転に先立ち、加湿管の液滴蒸発率改善、ガスタービンから圧

縮空気の抽気割合の改善など課題を摘出した。

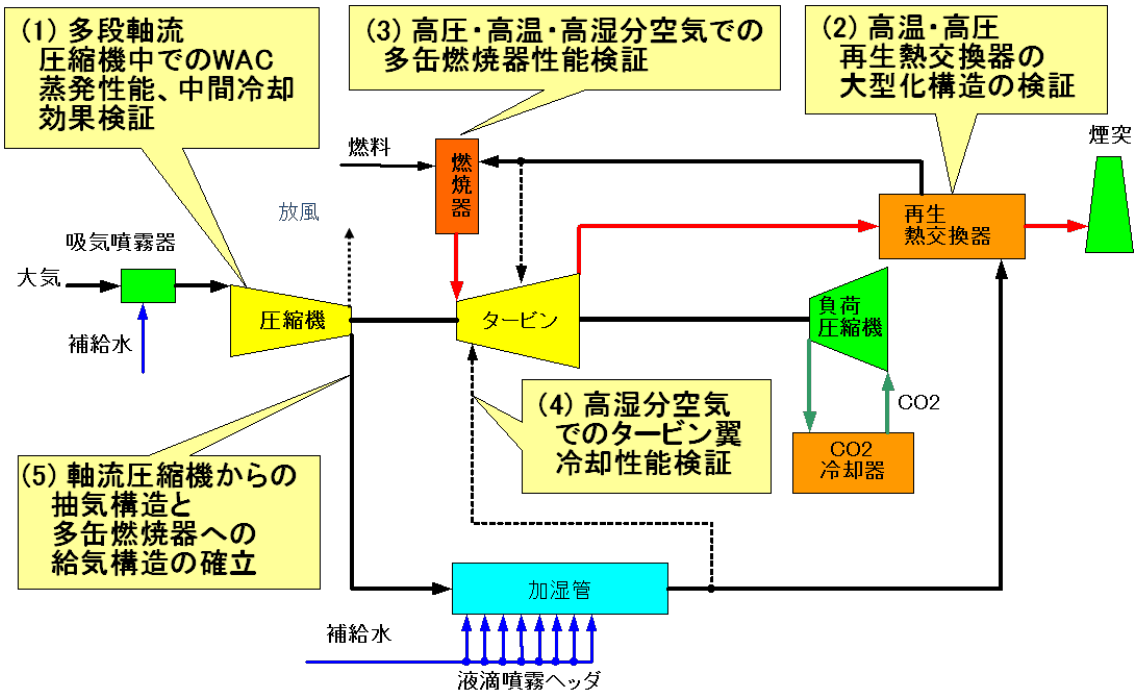


図３－６－A　40MW 級総合試験装置の系統構成と検証項目

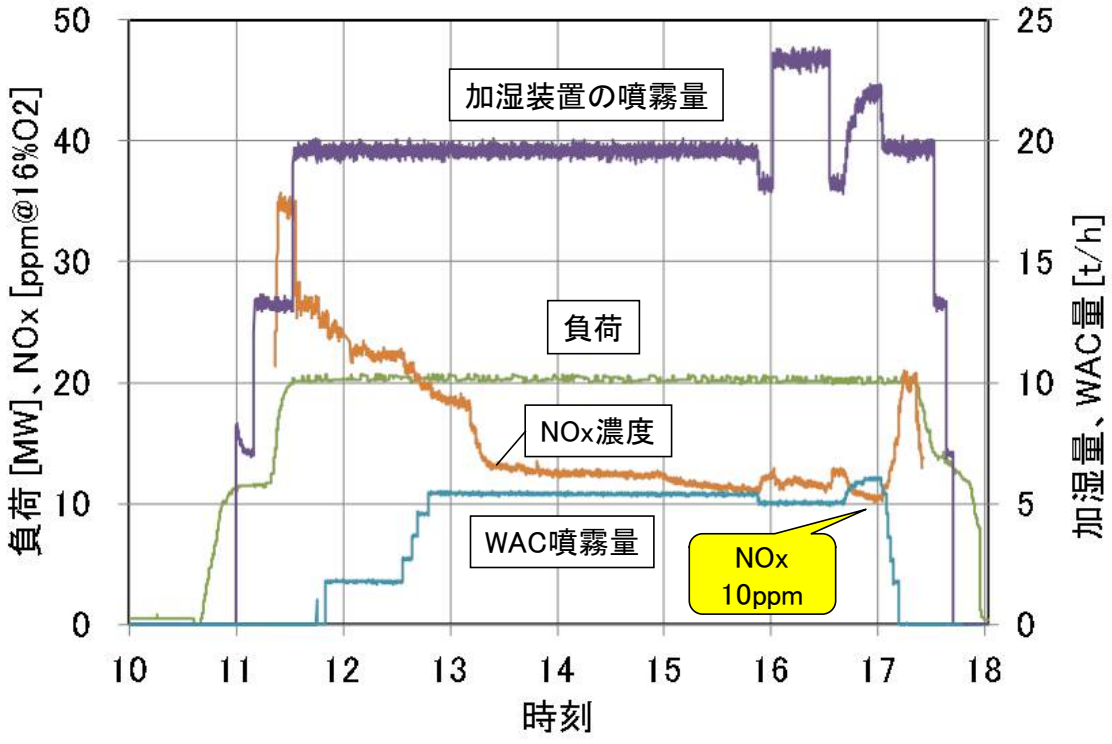


図３－６－B　40MW 級総合試験装置の運転曲線(2012 年 3 月 8 日)

（７）AHAT 特性解析

3MW 級検証機の実際の運転試験データから、大気温度変化による特性、部分負荷や起動特性などを解析・評価した。

図３－７-A に吸気水噴霧冷却（WAC）による発電端効率の大気温度および吸気湿分率に対する変化を示す。図が示すように吸気湿分率の増加に伴い発電端効率が上昇しており、吸気水噴霧冷却の効果を実際の運転データから確認できた。

一般にガスタービンの特性上、大気温度の上昇に伴い圧縮動力が増加するため発電出力が低下する。図３－７-A が示すように AHAT においてもその傾向が見られるが、水噴霧が無い場合（図中③）での発電端効率の低下割合（傾き）に比べて、水噴霧を行った場合（図中①、②）にはその低下割合は小さくなっている。これは、大気温度が上昇した際、水噴霧による吸気冷却効果によって圧縮機入口温度の上昇が抑制され、大気温度変化による発電端効率への影響が低減できるためと考える。

図３－７-B は大気温度変化に対する AHAT と既存複圧 GTCC の発電出力の変化であるが、図が示すように、AHAT システムは GTCC よりも大気温度上昇による出力の低下が少ないことが分かる。今回の検証機では WAC 蒸発量が 1.8wt%までであったため、3.5wt%を想定した中容量 AHAT の熱効率解析結果には及ばないものの、AHAT システムは GTCC よりも大気温度変化による影響を受けにくいことが実際の運転試験結果から得ることができた。発電端効率にも同じ結果が得られている。

水回収装置における水回収率の大気温度変化に対する変化を図３－７-C に示す。ここでの水回収率は、増湿塔での加湿量と吸気水噴霧の蒸発量の合計に対する水回収装置での水回収量の比率として定義した。大気温度が低い場合にはほぼ 100%水回収が出来ているが、大気温度上昇に伴い水回収率が低下している。これは、同図に示すように、大気温度の上昇により冷却水温度が上昇し、水回収装置出口のガス温度が上昇したため、増湿塔と同様、ガス中の飽和蒸気量が増加し、凝縮する水分量が低下したためと考えられる。年間を通じて高い水回収率を得るためには、各季節に応じた適切な冷却水流量、冷却水温度の管理が必要であり、そのために適切な水回収装置ならびに冷却設備の設置、運用が重要である。

図３－７-D は AHAT および既存複圧 GTCC の部分負荷特性を示す。商用機 AHAT のシミュレーションでは GTCC よりも高い部分負荷特性が示されているが、検証機の低負荷における発電端効率低下は GTCC のそれより大きいものであった。この理由として、IGV なしのため吸込空気流量による負荷制御ができず、燃焼温度による負荷制御であるため効率に与える影響が大きかったことと、約 60%以下の低負荷においては部分加湿モードで運転していることなどが挙げられる。今後、さらなるスケールアップ機により、部分負荷で効率を高める方法の

検討、実運転試験による効率向上と制御の安定性の確認が必要であると考える。

表３−７に、第 2 フェーズの試験で得られた起動時間および負荷変化率等の結果と、第 1 フェーズの結果および GTCC との比較を示す。負荷変化率について、これまで 3.3%/分で行ってきたが、燃料供給速度の向上、静定時間の排除などにより安定性を確認しながら向上させ、GT のみ（加湿なし）でのハーフロードまで負荷変化率は最大 15%/分を達成できた。その後の加湿による負荷変化は、本検証機においては手動により行っているため、2.3%/分から 3.3%/分の向上に留まったが、自動化によりさらに向上は見込めるものと考える。起動時間について、この負荷変化率の向上のほか、途中での静定を無くしても問題なく負荷上昇でき、その結果、GT 起動から最大出力まで約 60 分で起動できることが確認され、GTCC が 180 分（真空保持）であるのに比べ 1/3 に短縮できた。

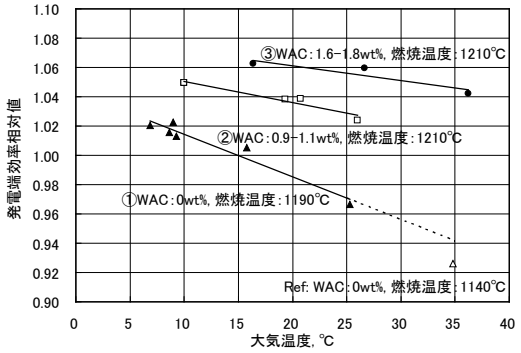


図 3-7-A 吸気湿分率および大気温度変化に対する発電端効率の変化

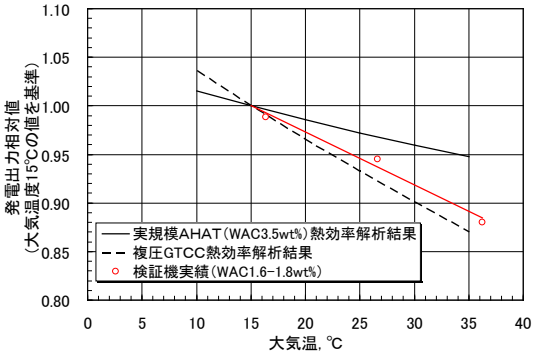


図 3-7-B AHAT と GTCC の大気温度変化に対する出力への影響の比較

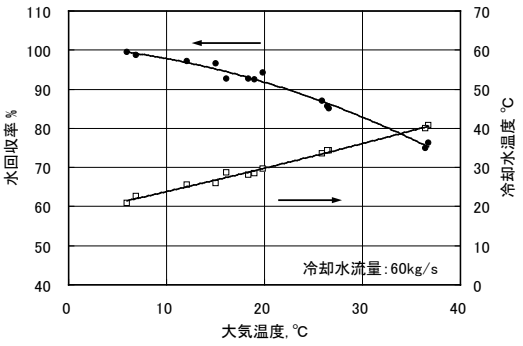


図 3-7-C 大気温度変化に対する水回収率および冷却水温度の変化

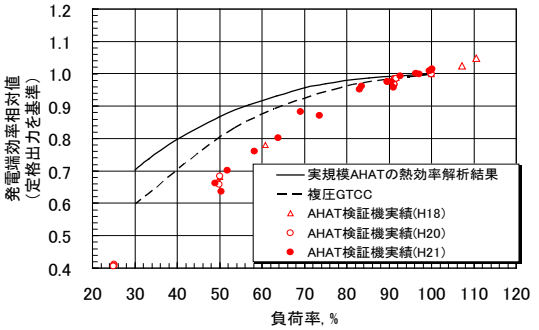


図 3-7-D AHAT と GTCC の部分負荷効率の比較

表３－７．各種運用性の比較

項　目	検証機実績(第１フェーズ)	**検証機実績(第２フェーズ)**	既存一軸型 GTCC 発電	課　題
起動時間 ホットスタート	－	－	約 60 分	
〃 コールドスタート	約 2 時間 40 分 （静定、データ採取時間含む）	**約 60 分** **（水系統起動時の場合）**	約 180 分 （復水器真空保持の場合）	水系統の自動化
負荷変化率	燃焼による負荷変化 3.3%/分 加湿による負荷変化 2.3%/分	**燃焼による負荷変化** **15%/分**（自動化） **加湿による負荷変化** **3.3%/分**（手動操作）	5.0%/分	加湿による負荷変化率向上
負荷制御	燃焼温度制御 増湿塔加湿量あり、なし WAC あり、なし	**燃焼温度制御** **増湿塔加湿量** **WAC 流量**	IGV 開度制御 燃焼温度制御	IGV の設置 低負荷での水噴霧

※WAC：
Water Atomization Cooling
（吸気噴霧冷却）

※IGV：
Inlet Guide Vane
（入口案内翼）

３－１－３　特許出願状況等

要素技術開発（2004 年から 2006 年）から通算した件数を表３-８に示す。ＡＨＡＴは、国内外の学会等で高い評価を得ており、海外発表で４回、国内発表で２回表彰されている。その中で、2010 年 6 月にはアメリカ機械学会(ASME)から年間最優秀論文として J.P. Davis 賞を与えられた。また、3MW 級検証機、40MW 級総合試験装置は、国内外の多数の顧客に視察頂き、ユーザーに関心を持たれている。

表３－８　特許・論文等件数

	要素技術開発				実用化技術開発				
年度 項目	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	合計
論文･解説	0	2	1	2	3	3	4	8	23
特許(公開)	3	10	12	7	8	11	6	6	63
国際会議 発表	1	2	1	2	4	1	1	6	18
国内会議 発表	2	0	5	7	5	1	3	1	24

３－２　目標の達成度

各項目の成果を示す。

①高湿分軸流圧縮機

開発した吸気噴霧冷却時の圧縮機性能予測アルゴリズムを用いて 40MW 級総合試験装置の圧縮機を設計し､最大で 1.7%の噴霧試験を実施した｡試験により、アルゴリズムの妥当性が確認された。また、このアルゴリズムによる計画噴霧量（3.5%）の予測結果から、3.5%噴霧時でも噴霧液滴は全量蒸発し、翼負荷等の信頼性に問題がないことを確認した。

②高湿分再生熱交換器

従来フィンより耐圧強度が高く、かつ伝熱面密度も極力大きくした新型高性能フィンを新たに開発することで、温度効率 90%以上、伝熱面密度 1000m2/m3 以上を達成した｡総合試験条件で温度効率 91.3%、圧力損失は設計仕様値以下を達成した。

③高湿分多缶燃焼器

総合試験機の起動から最大負荷まで，開発した多缶高湿分燃焼器構造が安定

に燃焼でき，最大負荷条件で NOx 排出量 10.3ppm，湿分が飽和条件となるフル AHAT システムの増湿塔方式では，目標としている 10ppm 以下を達成できる見通しを得た。

④高湿分冷却翼の開発

ハイブリッド冷却翼を開発し、通常冷却翼よりも少ない冷却空気量で、目標としていた冷却効率 70%以上を達成できることを確認した。

⑤３MW 級検証機

5～35℃の範囲で大気温度特性を取得した。増湿量のほぼ 100%を水回収できた。再生熱交換器の温度効率 90%以上を維持できていることを確認した。

⑥実用化技術総合試験装置

40MW 級総合試験装置を設計、製作し、50%負荷である 20MW まで到達した。29 回の起動、累計 65 時間運転し、吸気噴霧冷却、加湿管、再生熱交換器、高湿分冷却翼など、運転動作確認した。定格負荷での運転に先立ち、加湿管の液滴蒸発率改善、ガスタービンから圧縮空気の抽気割合の改善など課題を摘出した。

⑦AHAT 特性解析

３MW試験でｺｰﾙﾄﾞ起動時間 60 分を達成し、ｺﾝﾊﾞﾝﾄﾞｻｲｸﾙと比較し起動特性で優位であることを確認した。また、吸気水噴霧により効率向上が確認でき、大気温度上昇による効率低下が複圧 GTCC より小さいことが確認できた。一方、水回収効率が大気温度上昇により低下したため改善が必要であり、部分負荷特性もスケールアップ機での検証が必要であることを示した。

以上の成果により、本事業の目標を全て達成することができたと考えている。目標の達成度一覧を、表３-９に示す。

表３－９　目標の達成度一覧

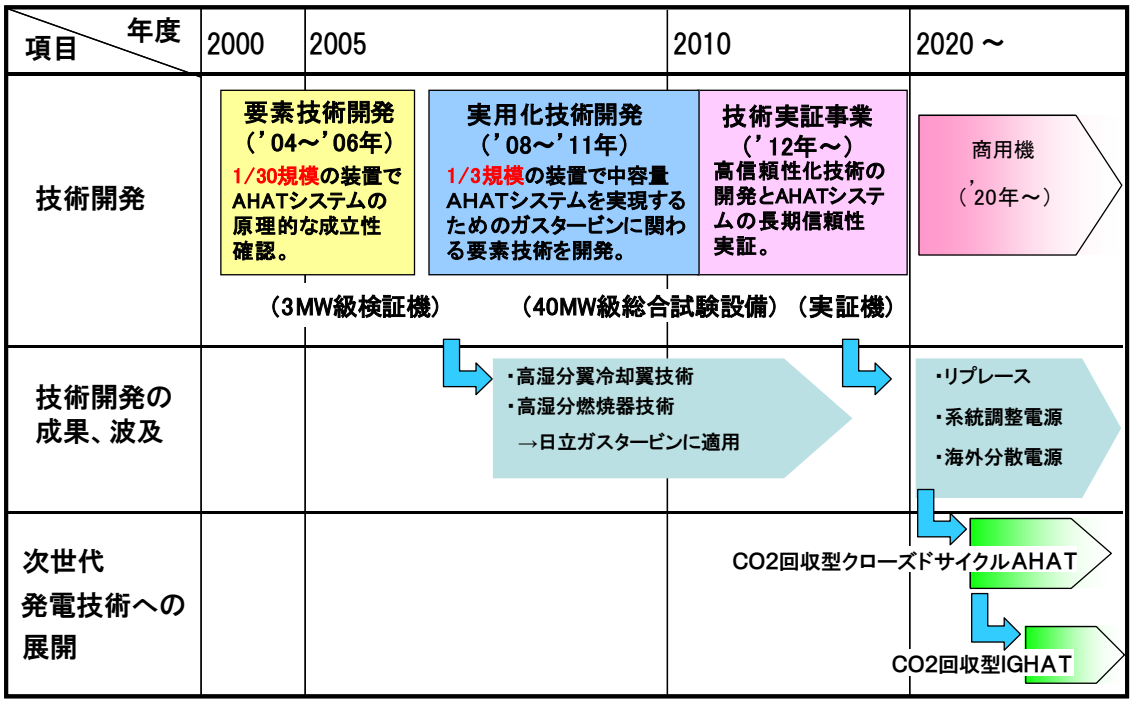
要素技術	目標・指標	成果	達成度
①高湿分 軸流圧縮機	・吸気噴霧量：3.5%以上	最大1.7%の噴霧試験によりアルゴリズムの妥当性を確認した。そのアルゴリズムを用いて3.5%噴霧時の信頼性を確認した。	達成
②高湿分 再生熱交換器	・温度効率：90%以上 ・伝熱面密度：1000m^2/m^3以上	高性能フィンの開発により伝熱面密度1160m^2/m^3を実現した。総合試験で温度効率91.3%、圧力損失は仕様値以内を達成した。	達成
③高湿分 多缶燃焼器	・NOx：10ppm以下	点火、昇速、加湿、吸気噴霧時の安定燃焼を確認した。湿分が飽和条件となるフルAHATシステムの条件で、NOx濃度10ppm以下の見通しを得た。	達成
④高湿分冷却翼	・冷却効率　静翼：70%以上 動翼：60%以上	高湿分低温空気を利用したハイブリッド冷却静翼を製作し、冷却効率70%以上を確認した。	達成
⑤3MW級検証機	・AHATプラント側の特性把握	システム特性、機器性能の向上、主要機器の経時変化ないことを確認した。	達成
⑥実用化技術 総合試験	・発電用ヘビーデューティー ガスタービンにAHATを適用	累計65時間運転し、吸気噴霧冷却、加湿管、再生熱交換器、高湿分冷却翼などの相互作用（性能）を確認、課題摘出した。	達成
⑦AHAT特性解析	・ユーザ視点からの システム評価	定格出力時の性能だけでなく、大気温度変化特性、部分負荷・起動特性を明らかにした。	達成

４　事業化、波及効果について

４－１　事業化の見通し

高湿分空気利用ガスタービンの実用化に当たっては、世界で初めて実用化されるシステムであり、開発リスクが大きいことから、表４-１の商用機までのロードマップに示すように、段階を踏んで開発を進めることによりリスク低減を図り、確実に技術開発を進めることが必要である。

表４－１　ロードマップ



（１）技術開発について

2004 年度から 2006 年度まで 3 年間の要素技術開発を予定通り実施し目標を達成できた。3MW級の検証機を建設し、ガスタービンと吸気噴霧冷却、増湿塔、再生熱交換器、水回収装置等を組み合わせたＡＨＡＴシステムが原理的に成立することを確認した。効率は小容量クラスのガスタービンシステムで最高レベルの 36.4%(ＨＨＶ)(40%(ＬＨＶ))以上を達成した。また、シミュレーションにより中容量ＡＨＡＴシステムで従来の同出力機より高い発電効率が得られることを確認した。3MW級検証機は高湿分空気を利用した再生型ガスタービンとして世界初のシステムであるため、要素技術開発ではシステムの成立性確認を最優先項目とし、ガスタービンはシステムを原理的に検証するために必要最小規模の小容量クラスで実施した。

実用化技術開発については、2008 年度から 2011 年度までの 4 年間に、予定通りに完了した。商用機のＡＨＡＴシステムは出力 100MW級の中容量のヘビーデューティー型ガスタービンであり、ガスタービンは小容量に比べて圧力が高く、

多段軸流圧縮機、多缶燃焼器、冷却タービンの構成となるため、小容量クラスのガスタービンとは異なる。よって、中容量ガスタービンでＡＨＡＴシステムを実現するため、各ガスタービン要素の実用化技術開発とそれらの技術を組合せた商用機の 1/3 スケールの総合試験装置によりガスタービンにかかわる技術を開発した。

2012 年度からの技術実証事業では、商用機と同程度規模で実際に発電することにより、表４-２に示した運用性、環境性、経済性の観点からＡＨＡＴを評価するとともに長期信頼性を確認する。長期信頼性を確認するには電力系統に接続する必要があり、ユーザーの参画が求められる。

なお、高湿分空気を利用したガスタービンシステムは、システム改良に主眼をおいた高効率化技術であり、1980 年に日本で考案された航空機転用型ガスタービンを利用する日本生まれの技術であるＨＡＴシステムが基礎になっている。その後、米国でシステム研究が行われ多くの派生システムが提案された後、1990 年代から電力事業用に使用されているヘビーデューティガスタービンに適用するように日本で再検討され、3MW級のＡＨＡＴシステム検証機によりシステム成立を世界に先駆け確認したことで日本が再び世界をリードしている。

ＡＨＡＴシステムは、夏季の出力低下が少ない（吸気噴霧冷却の効果）、部分負荷効率が高い（再生システムの効果）、起動時間が短い（蒸気タービン系が不要）、水回収により補給水が不要、設備費が低い、等の環境や電力需要への即応性が高いという点で好ましい特性を有しているが、日本独自の技術であるため前例がなく、商用機にいたるまでの技術課題が多い。産業界のみで本技術開発を進めていくにはリスクが高く、引き続き国の関与と支援が必要である。

（２）技術開発の成果、波及について

要素技術開発で開発した高湿分翼冷却技術については、対流冷却での伝熱促進技術を日立ガスタービンの冷却翼に適用しており、冷却空気量削減による高効率化、ＣＯ２削減に寄与している。また、要素技術開発で開発した高湿分燃焼技術についても、多孔同軸噴流技術を日立ガスタービンの燃焼器に適用しており、低ＮＯｘ化による環境負荷低減に寄与している。

IEA による世界エネルギー需要予測を図４-２に示す。天然ガスは、シェールガスなど非在来型ガスの掘削技術が開発され、世界的な需要拡大が見込まれる。また、電力中央研究所による、わが国の電源構成推移を想定した図を図４-３に示す。電力需要の増加に伴う LNG および石炭火力の新設、増設に加え、2010 年頃からは 40 年を寿命と考えた場合、寿命を迎えるプラントが急増しリプレース市場が活発化すると考えられる。ピーク・ミドル運用に適した中容量ＡＨＡＴシステムは、新増設需要に加え、次のようなリプレース市場への導入も見込まれる。

・LNG 火力リプレース市場
・石油火力リプレース市場（燃料転換にも対応、ガス焚き、油焚き）

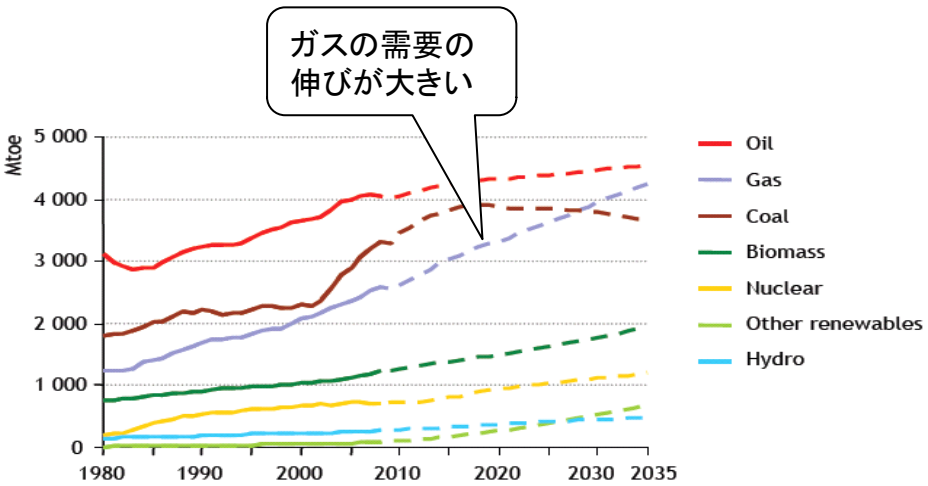


図４－２　世界エネルギー需要予測（出典：IEA World Energy Outlook (2011)）

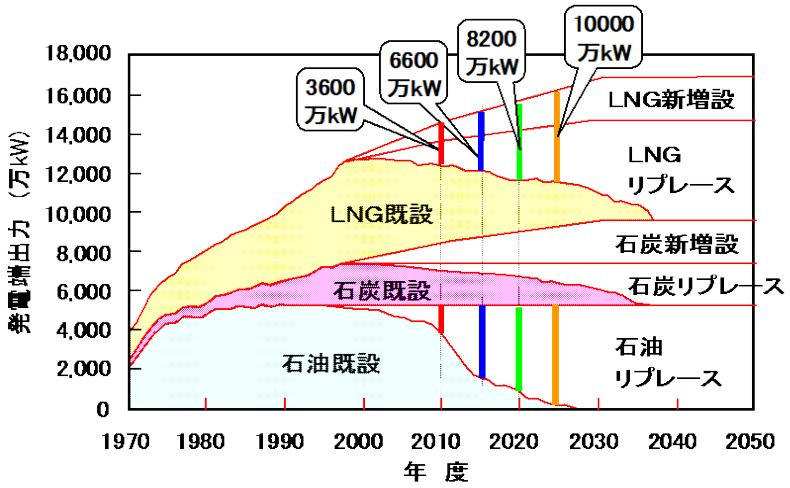


図４－３　日本における電源構成の推移推定例(寿命 40 年)
(出典：電力中央研究所「第 18 回ｴﾈﾙｷﾞ未来ﾌｫｰﾗﾑ」(1999))

また、世界全体のガスタービン発電市場は国内発電市場の 10 倍以上の規模があり、世界に先駆け、中容量の高効率発電システムが日本で実用化できれば海外展開として市場が開ける。100MW 級以下の高効率中小容量発電システムは送電網系統のインフラ整備が不充分な地域、特にエネルギー需要が急増している中国等アジア地域において、分散電源として地域の電源供給に貢献できる。ま

た、分散電源としての海外への市場展開を図ることにより、外貨獲得および国内産業への波及効果が期待できる。

表４-２に、AHAT のセールスポイントとユーザーのメリットを示す。

効率は中小容量クラスでは GTCC と同等以上であるが、このクラスのガスタービンは、欧米メーカーが技術的に先行し、販売シェアを占めている。そこで、独自の高湿分空気利用によるセールスポイントを付加して、事業化する戦略とする。

（運用性）

蒸気タービンがなくコンバインドサイクルに比べて高いフレキシビリティ(起動速度、負荷変化速度)が期待できる。特にコールド起動時間(ガスタービンや蒸気タービン、プラント機器が常温状態からの起動時間)は、排熱回収ボイラと蒸気タービンの暖機が不要のため、GTCC よりも高速な 60 分を目標としている。

（環境性）

高湿分燃焼によって燃焼温度分布の均一化が可能であり、低 NO x 化が可能である。プラントの排熱において高温側と低温側の温度差を約２倍取れるため、空冷式とした場合でもコンバインドサイクルの場合の約半分の伝熱面積とすることを目標としている。空冷式の採用により、冷却水が利用できない内陸部への立地が容易となり、温排水の制約も緩和できる。

（経済性）

蒸気タービンがないことから機器構成がシンプルで設置工事の工期が短くて済み、建設費を低減できる。水回収により、補給水ゼロも可能となり、水資源が希少な地域で経済性メリット大きい。

表４－２AHAT のセールスポイントとユーザーのメリット

比較項目		AHAT（目標）		GTCC(ガスタービンコンバインドサイクル)	顧客ターゲットとメリット
効率	発電効率	○	200MW以下の同出力レベルでGTCCと同等以上	ベース	・日本、欧米：CO2削減による環境保全 ・アジア、欧州：ランニングコスト低減による経済性向上
運用性	起動時間	◎	ホット起動：30分 コールド起動：60分 （蒸気タービン無）	ホット起動：60分 コールド起動： 180分 （蒸気タービンの暖機必要）	全地域：再生可能エネルギーとの連携（負荷変動への対応）
	負荷変化率（時間あたりの出力の変化率）	◎	ガスタービン単独の場合と同等 （10%/min程度）	蒸気タービンの負荷変化率に依存 （5%/min程度）	
環境性	NOx（窒素酸化物）排出濃度	○	脱硝装置無しで10ppm以下 （高湿分燃焼）	脱硝装置必須	日本、欧米：低NOx排出による環境保全
	立地の自由度	◎	水回収装置の空冷化が比較的容易、内陸部にも設置可能 伝熱面積：50%	蒸気タービンの復水器の空冷化は伝熱面積大きく、臨海立地向き 伝熱面積：100%	・日本：自治体、事業者向けリスク回避型分散電源(内陸立地) ・中東、アフリカ、欧米：内陸部、グリッド未整備地域へ中小容量分散電源
経済性	機器コスト	◎	蒸気タービン系無しのため、GTCC以下	ベース	全地域：イニシャルおよびランニングコスト抑制による経済性(ライフサイクルコスト)最小化
	建設期間	○	蒸気タービン系無しのためGTCCより短工期	ベース	
	水消費	○	水回収により、補給水ゼロも可能	排熱回収ボイラのブロー水の補給	渇水地域：高効率発電プラントを導入により、環境保全、経済性向上

次に、2010 年に運開した出力 50MW～200MW の中小容量ガスタービンの立地点に関し、地域別に臨海部か内陸部か分類した結果を図４－４に示す。同図によると、海に囲まれている我が国と異なり、世界全体でも内陸立地の割合は大きく、特に中東、アフリカの内陸立地の割合は大きい。発電効率がコンバインドサイクルと同等以上に高く、内陸立地も容易な AHAT システムが実用化されれば、これらの地域に導入できると考える。

ターゲット市場と戦略を、地域別に整理して表4-5に示す。同表に記載した主な戦略をまとめると、以下となる。

(a) 国内は、従来からターゲットとしてきた LNG 火力リプレース、石油火力の燃料転換にも対応したリプレース市場だけでなく、エネルギーセキュリティー確保を目的とした自治体、発電事業者を新たなターゲットとする。

(b) 海外では、欧米など再生可能エネルギーの導入が多い地域の他、立地の自由度のメリットを生かし、中東、西アジア、アフリカ等の内陸部、グリッド未整備地域を中心にシェア拡大化を狙う。これらの国に導入することで、我が国には資源権益確保が可能となり、双方にメリットが生じる。

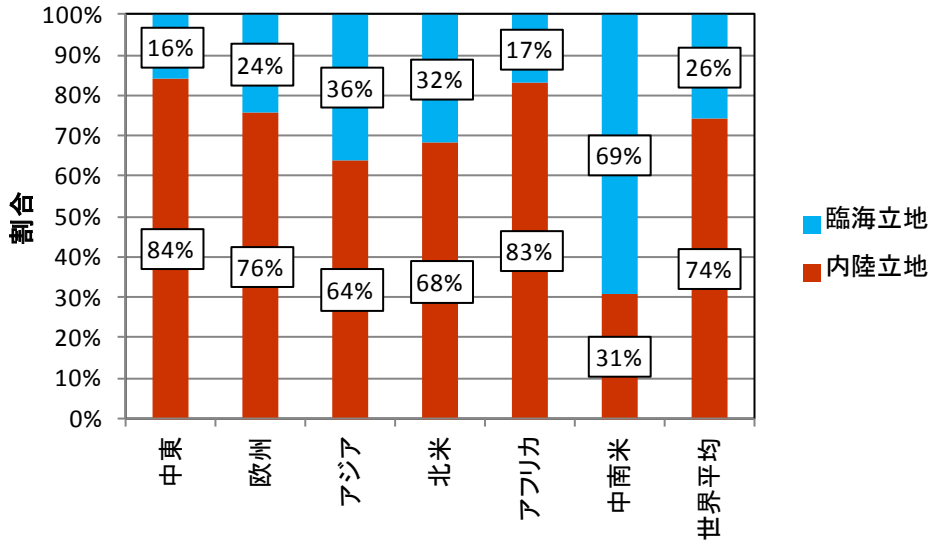


図４－４　地域別立地点の割合(2010年運開分)(出典：日立調査結果)

表４－５　ターゲット市場と戦略

No.	市場	特徴	戦略
1	国内	・再生可能エネルギーとの連携ニーズ大 ・震災以降、エネルギーセキュリティー確保を目的とした分散電源のニーズ	・LNG火力リプレース、石油火力の燃料転換などのリプレース市場のユーザーに提案する ・内陸立地の分散電源の案件を狙う
2	欧米	再生可能エネルギーとの連携ニーズ大	起動時間、負荷変化率のメリット生かし再生可能エネルギーとの連携向けを狙う
3	中国、東南アジア	・中国の内陸部の発展 ・高気温	・内陸立地の分散電源の案件を狙う ・高気温地域に、出力低下が少ない点をアピールする
4	中東、西アジア、アフリカ	・高気温 ・水が乏しい ・グリッド未整備地域多い	・高気温地域に、出力低下が少ない点をアピールする ・水が乏しい地域に、補給水が少ないまたは不要な点をアピールする ・グリッド未整備の内陸立地の分散電源の案件を狙う

４－２　波及効果

高湿分空気利用ガスタービン技術は下記次世代システムの基盤技術になり、開発を推進していくことは重要である。

・　ＩＧＣＣと高湿分空気利用ガスタービン技術の融合

石炭ガス化複合発電ＩＧＣＣと高湿分空気利用ガスタービン技術を組み合わせたＩＧＨＡＴが提案されている。ＩＧＨＡＴは石炭ガス製造時の排熱を水蒸気としてガスタービンに取り込むことができるためＩＧＣＣよりも効率が高く、単位出力あたりの設備コストも安くなると評価されている。

ＣＯ２をガス化剤とする酸素吹きガス化炉とクローズドサイクルＡＨＡＴを組合せることでＡＨＡＴの作動流体はＣＯ２と水蒸気が主成分となり、水回収装置で水を除去すれば、ＣＯ２分離動力を必要とすることなく低温度のＣＯ２を回収することができ、高効率ＣＯ２回収システムが実現できる。また、ガス化ガスの代わりに天然ガスとすることでＣＯ２回収型クローズドＡＨＡＴを実現できる。

・水素燃焼ガスタービン

水素は高い燃焼温度が得られ、燃焼生成物は水蒸気である。水素燃焼ガスタービンの実現には超高温ガスタービンの技術とともに、高湿分空気利用ガスタービン技術も有効な基盤技術となることが期待される。

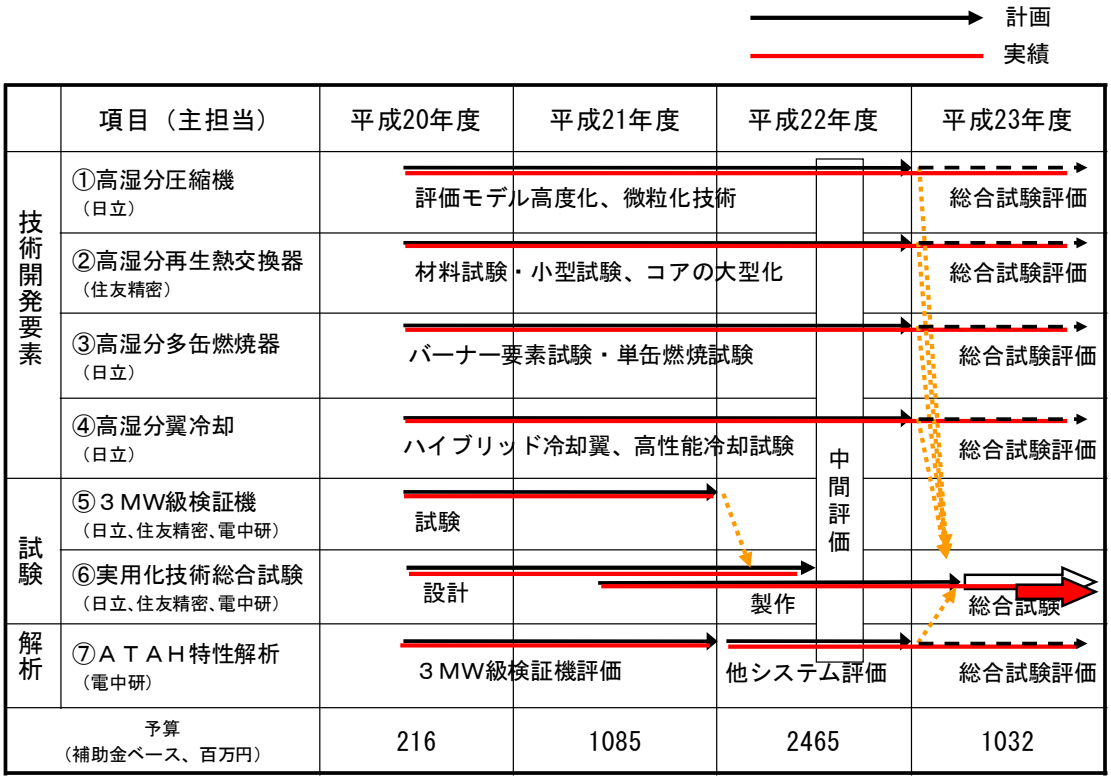
以上示したように、ＡＨＡＴシステムは極めて重要な技術開発といえる。

５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

５－１　研究開発計画

表５－１に、各実施項目の工程に関し、計画と実績を示す。平成 23 年 3 月の震災により、総合試験設備の建設が遅延したが、平成 24 年 1 月に運転開始することができ、各項目とも当初の目的を完遂した。

表５－１　ＡＨＡＴの研究開発計画



５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

円滑な推進と最大限の成果を達成するため、図５-１に示す 3 事業者で分担し開発を推進した。ガスタービンシステム及び全体取りまとめを日立製作所が担当し、高温熱交換器の専門メーカーである住友精密工業がガスタービン用再生熱交換器を担当した。また新型システムの実用化にあたって重要な、電力等のユーザーの視点に基づくシステム評価を電力中央研究所が実施した。3MW級検証機による試験は 3 事業者が協力して実施した。40MW 級総合試験装置による実用化技術総合試験についても 3 事業者が協力して実施し、研究の加速と事業の適正な推進を図った。

○　プロジェクトリーダー：　（株）日立製作所　圓島　信也

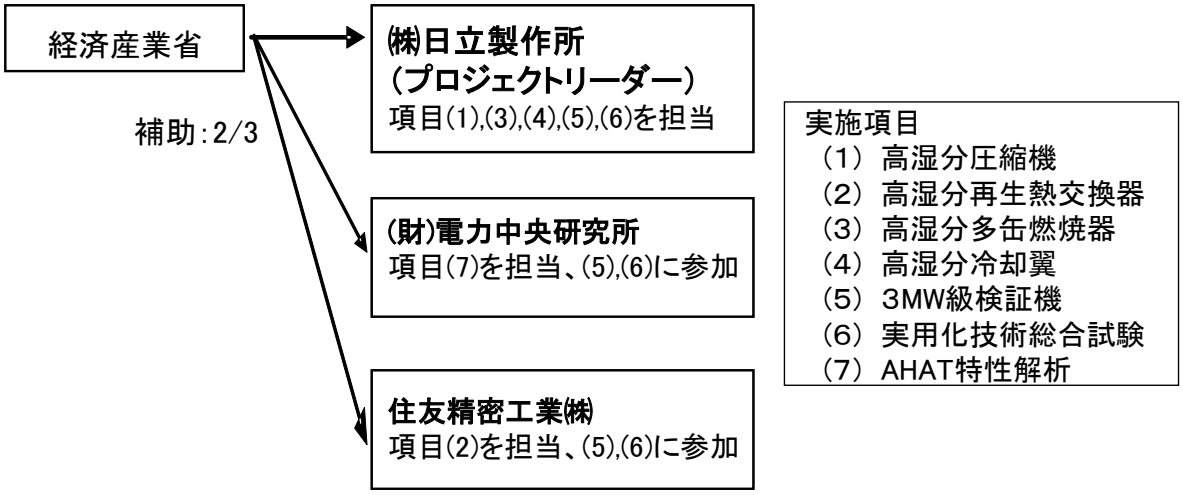


図５－１　ＡＨＡＴ研究開発体制

５－３　資金配分

技術開発要素、総合試験装置、特性解析の各段階において適切に資金を配分し、事業の円滑な推進に努めた。各機器の総合作用を確認する総合試験装置に全体の 89%を使用した。

表５－２　資金配分（事業費ベース）

（単位：百万円）

年度　平成	２０	２１	２２	２３	合計
高湿分圧縮機	12.0	37.1	17.0	20.9	87.0
高湿分再生熱交換器	78.5	56.1	32.8	33.0	200.4
高湿分多缶燃焼器	32.0	103.0	27.4	25.0	187.4
高湿分翼冷却	15.0	55.0	36.5	14.0	120.5
３MW級検証機	90.0	114.0	0.0	0.0	204.0
実用化技術総合試験	92.6	1259.0	3582.0	1452.0	6385.6
ＡＴＡＨ特性解析	3.9	3.8	2.3	3.1	13.1
合計	324.0	1628.0	3698.0	1548.0	7198.0

５－４　費用対効果

本事業には、4年間で48億円の補助金が投じられ、ＡＨＡＴシステムの有効性を確認しシステムの成立性の目処をつけるなどの成果をあげた。

ＡＨＡＴシステムは世界初の高湿分再生型ガスタービンシステムとして国内外の学会では高い関心を寄せられており、2008年日本ガスタービン学会から技術賞を受賞した。2009年米国機械学会ASME Turbo EXPOのCycle Innovations 部門からBest Paper Awardを受賞し、さらに2010年米国機械学会ASME Turbo EXPOでは､全部門の中から唯一与えられるJ.P. Davis賞を受賞した｡これらを含め、海外４回、国内２回の表彰を受けている。

（ＣＯ２削減効果）

中容量ＡＨＡＴのＣＯ２排出原単位は　0.35kg-CO2/kWhとなり、この値はリプレース対象と想定される既存の中容量コンバインドサイクル(CC)、油焚き汽力に対し大きなCO2削減率が期待できる。

	燃料	送電端効率 (%HHV)	CO2 排出原単位 (kg-CO2/kWh)	AHAT 導入時の CO2 削減率
中容量 AHAT	LNG	51	0.35	-
既存中容量 CC	LNG	44	0.405	15%
油焚き汽力	油	39	0.70	50%

また、年間CO2削減量として、2020年までのＡＨＡＴ導入量を820万kWとし、年間稼働時間を3000時間/年・台とした場合　年間CO2削減量は530万ton/年となる。これは我が国の電気事業全体が年間に発生するCO2量の1.4%に相当する。

５－５　変化への対応

燃料価格の高騰、電力の安定供給を背景に燃料多様化へのニーズが拡大しており、ピーク運用に関し、燃料をＬＮＧだけでなく油まで対象を拡大し、油焚きＡＨＡＴシステムを開発しておくことが有効である。

太陽光発電の大量導入計画により、火力発電には運用性の見直しがもとめられてきており、運用性に優れたＡＨＡＴは調整用電源として有効である。

さらに火力発電にはＣＯ２排出抑制が強く求められており、ＣＣＳ Ready の要求が将来的には広がってくると予想される。ＡＨＡＴはクローズドサイクルにすることで CO２分離動力なしに高効率に CO２を回収できる特長を備えている。

Ｂ．高効率ガスタービン技術実証事業

B1．1700℃級ガスタービン技術実証事業

１．事業の目的・政策的位置付け

１－１　事業目的

本事業は、我が国の電源構成の約９割を占める火力発電の高効率化を図り、エネルギーセキュリティーの確保及び地球環境問題双方に対応すべく、世界をリードする高効率ガスタービンの実用化に向けた技術開発を実施する。

高効率天然ガス火力発電は、他の化石燃料に比べて環境負荷が少ない天然ガスを燃料とし、ガスタービンと蒸気タービンの双方を利用する複合発電技術に代表される。　ガスタービン技術の性能向上により、発電効率が現状の 1500℃級複合発電の 52%程度、さらに運用が始まった最新の 1600℃級複合発電の 54%レベルから 57%（送電端、HHV 基準）まで向上すれば、二酸化炭素排出量はさらに約 6%の削減が可能である。

（１）事業の科学的･技術的意義

本事業は、複合発電の熱サイクル温度を現状の 1600℃級から世界初の 1700℃級に高める。これにより、高温化でリードしている我が国のリードを確保する。前例がない未知の領域での技術開発となるため、燃焼技術、冷却技術、遮熱コーティング、空力技術などで、独創性の高い新技術の開発が必要となる。

また、排熱再循環システムを用いた燃焼器については、排ガス中の CO2 濃度が約 8%となり、CO2 回収が効率的に実施可能な濃度レベルとなる。これが可能となれば、元々CO2 排出原単位が一般の火力発電の中で最も小さい複合発電の CO2 排出量（発電効率 52%で、0.34kgCO2/kWh）を約 0.03kgCO2/kWh と現状比の約 1/10 以下に出来る可能性がある。

さらに 1700℃級ガスタービンが実現できれば、石炭ガス化発電 IGCC にも応用可能であり、1700℃級 IGCC が実現可能となる。このほかに、燃料電池とガスタービンの組合せによるハイブリッドサイクルや、原子力発電の夜間電力を利用し手製造した水素燃料を用いた複合発電も可能となる。これらは、エネルギーセキュリティ上重要な将来技術であるが、多様な燃料を使用可能な高温ガスタービンは、これらの革新的な技術に実用化において中核となる技術である。

（２）社会的・科学的意義

（ CO2 削減効果）

地球温暖化問題に対応する CO2 削減効果は、前述のとおりである。

（ 高温化技術の波及効果）
超高温・1 万 G を超える高遠心力の厳しい条件下で 1 年以上の連続運用が求められる発電用ガスタービンは、ロケットエンジンなどと同様、あらゆる機械製品の中でも最も技術の裾野が広く、且つ、先進性の高い機械のうちのひとつであり、高い完成度が求められる。従って、燃焼、伝熱、材料、空力など複数の分野に跨る本プロジェクトの波及効果は非常に大きい。特に高温化技術は科学技術的に、その実用的な目標を与えるという観点でも重要である。

１－２　政策的位置付け

１－２－１　低炭素社会づくり行動計画（2008 年 7 月閣議決定）

世界の温室効果ガスの排出を 2050 年までに半減するという長期目標を達成するため、革新的な技術開発の重要性が掲げられており、2008 年 7 月に閣議決定された「低炭素社会づくり行動計画」において、2050 年までに二酸化炭素の排出を現状から 60～80%削減するという目標が掲げられている。このような 2050 年に向けた削減努力に対して、経済産業省では「Cool Earth－エネルギー革新技術計画」を設定し、「高効率天然ガス火力発電」を含む 21 分野の技術の開発による目標達成を目指している。これを受け、本計画では、技術開発ロードマップの着実な実施が必要とされている。

１－２－２　エネルギー基本計画（2010 年 6 月 18 日閣議決定）

また、エネルギー基本計画(2010 年 6 月 18 日閣議決定)において、「その他の火力発電については、新増設・更新の際には、原則としてその時点における最先端の効率を有する設備の導入を目指す。」と謳われており、1700℃級ガスタービンに代表される超高温高効率ガスタービンは、現状最も高効率の火力発電技術として、リプレースにおける大容量機のエネルギー効率向上に寄与できる技術である。

１－２－３　日本再興戦略　（2013 年 6 月 14 日閣議決定）

「日本再興戦略　-JAPAN is BACK-」(2013 年 6 月 14 日閣議決定)において、成長戦略を実行・実現するものとして、政権を挙げて優先的に取り組むべき施策を厳選し、３つのアクションプランが打ち出された。
このうちの、「戦略市場創造プラン」は、課題先進国としての現状を攻めの姿勢で捉え、社会課題を世界に先駆けて解決することで新たな成長分野を切り開こうとする、未来を睨んだ中長期戦略である。プランの実行により、課題克服による不安の解消と、成長産業の育成の同時達成を目指すとされている。
より具体的には、エネルギー制約などの社会課題は、今後確実に巨大なグロ

ーバル市場を形成。日本はこれら課題の先進国であり、高度な技術力で市場を獲得する潜在力を有するが、

－規制制度や慣習に縛られていること、

－ビジネスを展開するインフラが未整備であること、

などにより市場形成に至っていない。世界でも最先端の研究開発でしのぎを削っている分野での取組の遅れは、容易に取り戻すことが困難である。

このため、世界や我が国が直面している社会課題のうち、「日本が国際的に強み」を持ち、「グローバル市場の成長が期待」でき、「一定の戦略分野が見込めるテーマ」として、４テーマのうちの一つとして、「クリーンかつ経済的なエネルギー需給の実現」を選定し、集中改革期間経過後の「2020 年」、中期的な政策展開の観点から「2030 年」を時間軸とし、研究開発から規制緩和に至るまで政策資源を一気通貫で集中投入するための「ロードマップ」を策定することとなった。

(1) 2030 年の在るべき姿

アジアを始めとする新興国での需要の増大、シェールガス革命を経た供給構造の変化、世界及び各地で高まる環境負荷など、変わりゆくエネルギー情勢の中で、低廉な価格で必要なときに必要な量のクリーンなエネルギーを安心して利用できる社会を実現する。また、時間・場所の制限を越え、エネルギー需給の無駄を省き、エネルギーを余すことなく徹底的に活用することにより、環境負荷を減らし、日本全体で最適なエネルギー利用を実現する。

次の３つの社会像を実現したエネルギー最先進国を目指す。

① クリーンで経済的なエネルギーが供給される社会

② 競争を通じてエネルギーの効率的な流通が実現する社会

③ エネルギーを賢く消費する社会

このため、今後取り組むエネルギー構造改革の中で、新たに生まれる技術や事業の芽を着実に育て、大きく発展させることにより、確実に果実を生み、成長を支える環境・エネルギー産業を創造するとともに、多様・双方向・ネットワーク化によるクリーン・低廉なエネルギー社会の構築を目指す。

また、深刻化する地球環境問題の解決にも積極的に貢献していくため、我が国の優れた環境・エネルギー技術の展開を通じて、新興国を始め、世界全体で急速に拡大する環境・エネルギー関連市場を獲得していく。

(2) 個別の社会像と実現に向けた取組

① クリーンで経済的なエネルギーが供給される社会

Ⅰ) 社会像と現状の問題点

エネルギー源の供給途絶や価格の乱高下等、予期せぬエネルギー情勢の変化があったとしても、国民や企業が、いつもと変わらず、低廉な価格で必要な時に必要な量のクリーンなエネルギーを安心して利用できる「エネルギーが身近で使いやすい環境」を目指す。

一方、東日本大震災以降、老朽火力のたき増し等により、火力発電の燃料コストが大幅に増加している。

Ⅱ) 解決の方向性と戦略分野（市場・産業）及び当面の主要施策

高効率火力発電を徹底活用し、エネルギーコストを低減させる。火力電源の新増設・リプレースを原則入札にして効率性・透明性を高めるとともに、環境アセスメントの明確化・迅速化を図り、民間企業が高効率な火力発電（石炭・LNG）に円滑に投資できる環境を整備する。同時に、先進技術開発を加速し、世界最高水準の効率を有する火力発電を我が国で率先して導入するとともに、世界へ積極的に展開する。

〇火力発電の技術開発支援

・LNG 火力について、2020 年頃までに 1700 度級ガスタービンの実用化を目指す（発電効率：現状 52%程度→改善後 57%程度）。

１－２－４　総合科学技術会議　環境エネルギー技術革新計画

また、総合科学技術会議の環境エネルギー技術革新計画において、高効率天然ガス発電技術のロードマップが示された(図１参照)。　この中でも 2020 年をターゲットに、57%の発電効率を目指すことが記載されている。

出所：技術戦略マップ２０１３年９月

図１．技術ロードマップ（高効率天然ガス発電）

１－３　国の関与の必要性

火力発電の高効率化のためには、燃焼、材料等の革新的な技術開発が必要で産学の連携が必要であるが、研究開発成果の商業性や投資回収可能性に係るリスクが大きく、民間企業のみではできない研究開発分野である。実用化まで長期のリードタイムと多大な研究開発投資を必要とする技術開発を推進するには、官民がその方向性を共有する事が不可欠である(図 2 参照)。

（１）国家エネルギー戦略における位置づけと開発競争のスピード
各国家において、エネルギーセキュリティ・経済性・環境問題の解決の全てに深く関係するため、その先進性・困難性にかかわらず、ガスタービンの高温化はスピードが非常に速く、国家間の開発競争は熾烈を極める。発電用ガスタービンは、1980 年代初頭の複合発電システムの導入以降、年間約 20℃という早いペースで燃焼温度の高温化が進み、熱効率が改善してきた。熾烈な開発競争の中、高温化に対して技術的に開発が可能な国は、米・独・日の 3 カ国に絞られつつある（図 3 参照）。

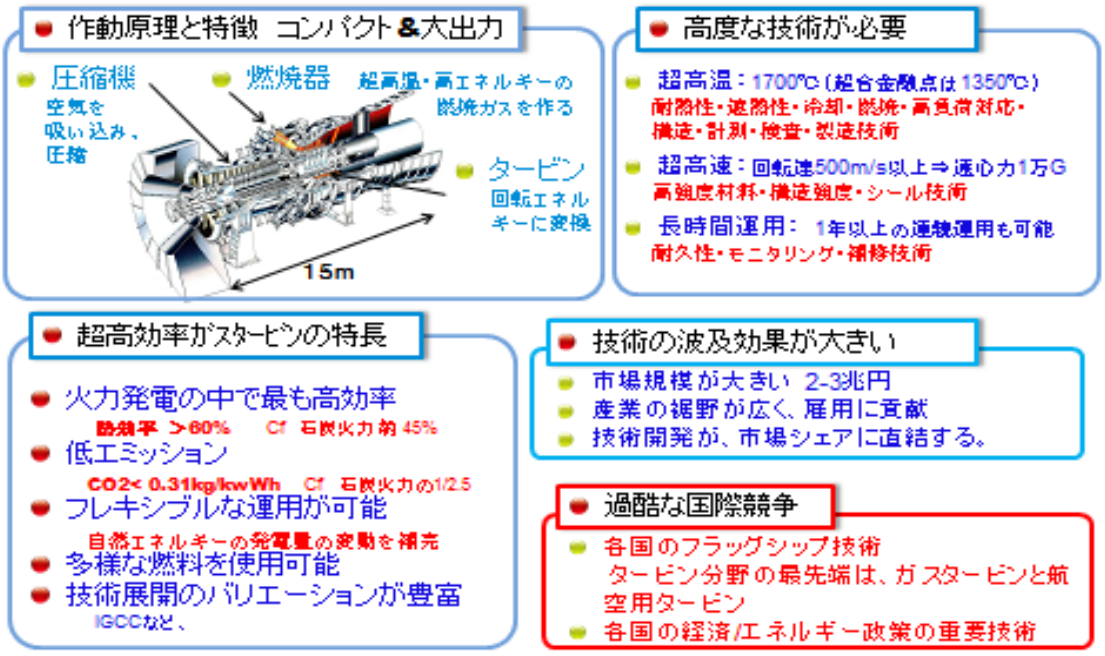


図２　発電用大型ガスタービンの特徴と、国の関与の必要性

（２）本技術分野における我が国の優位性

我が国は、世界に先駆けて 1500℃級のガスタービンを実用化し、発電効率 52%を達成しており、本分野をリードしている。しかし、世界市場でのシェアは欧米メーカーが大きく、積極的な技術開発を進めている中で、我が国の優位性は予断を許さない状況にある。

したがって、厳しい国際競争の中でわが国のリードを保つためには、一刻も早く革新的な技術を実用化して実機に展開する必要がある。このため、1700℃級ガスタービンの開発に取り組むことにより、発電効率 57%の実用化を目指し、革新的な技術開発を推進する必要がある。

（３）米国 DOE 支援による技術開発

1700℃級ガスタービンの開発は、石炭ガス化複合発電等、他の発電技術にも適用可能な重要技術であり、米国においてもエネルギー省（DOE）の High Efficiency Engines and Turbines Programs により国家的な支援の下で技術開発が進められている(図 3 参照)。

我が国においても、産学官の連携の下、着実な技術開発により早期の実用化、実証運転による信頼性の確立等を図ることが必要である。

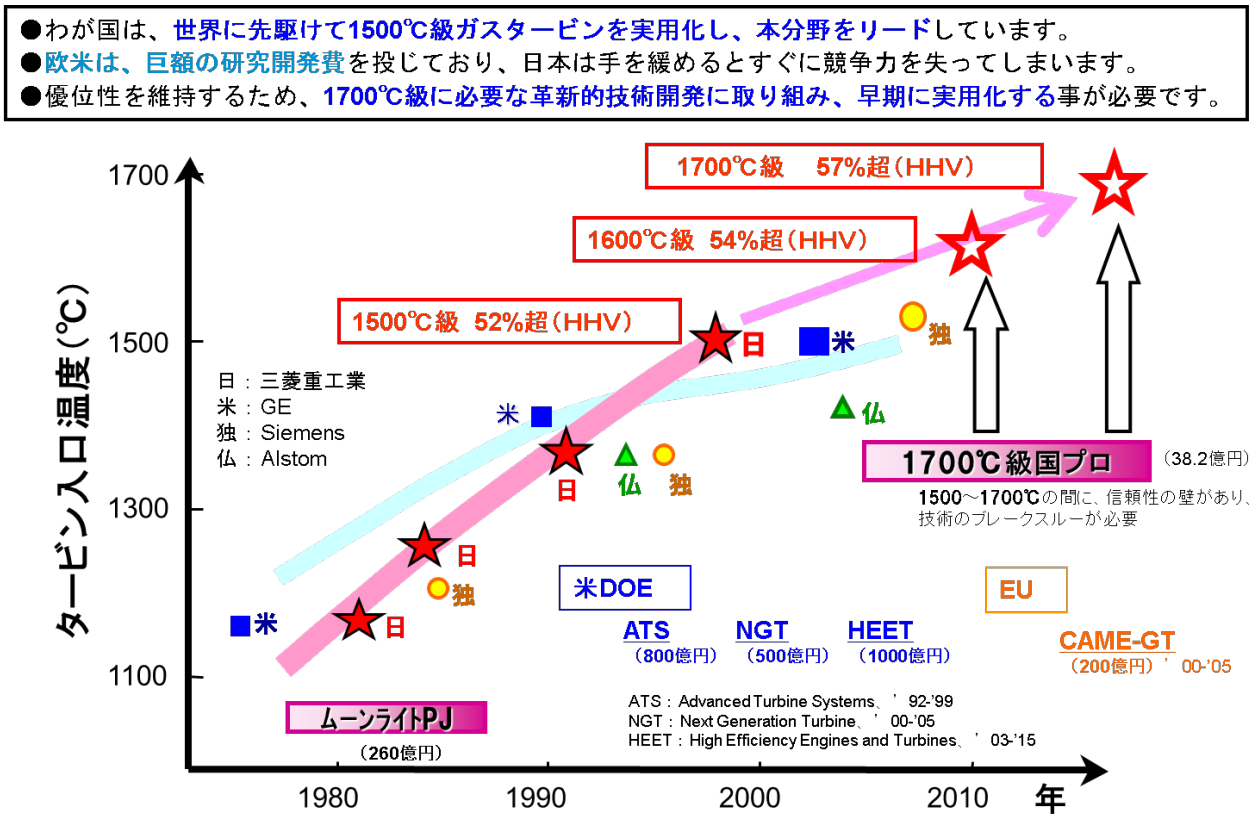


図３　　ガスタービンの高温化と各国の開発競争

（４）補助率の妥当性

本事業は、4 年間の要素技術開発（技術開発事前技術検証）とそれを基にした 5 年間の実証試験の計 9 年間の計画となっている。

4 年間の要素技術開発（技術開発事前技術検証）では、更なる高性能化を狙う（目標を従来の５６%⇒５７%に１ポイント向上）ために、

●主要コンポーネントの先端要素技術のさらなる高度化

を狙う。これに加え、以下の要素技術開発が必要となる（図４参照）。

●主要コンポーネント以外で、設計に必要な先端要素技術

●製造に先立ち準備しておくべき、先端製造技術や検査技術

●試運転時にガスタービン内部の温度や振動を計測するための特殊計測技術

これらは、いずれも最先端の要素技術であり、実用化のリスクも高いため、産学の連携が必要となる。また、開発には数年間のリードタイムが必要であり、信頼性確保のためには、試行錯誤が必要となるため、最初の４年間の要素技術開発に対しては、２／３の補助率が妥当である。

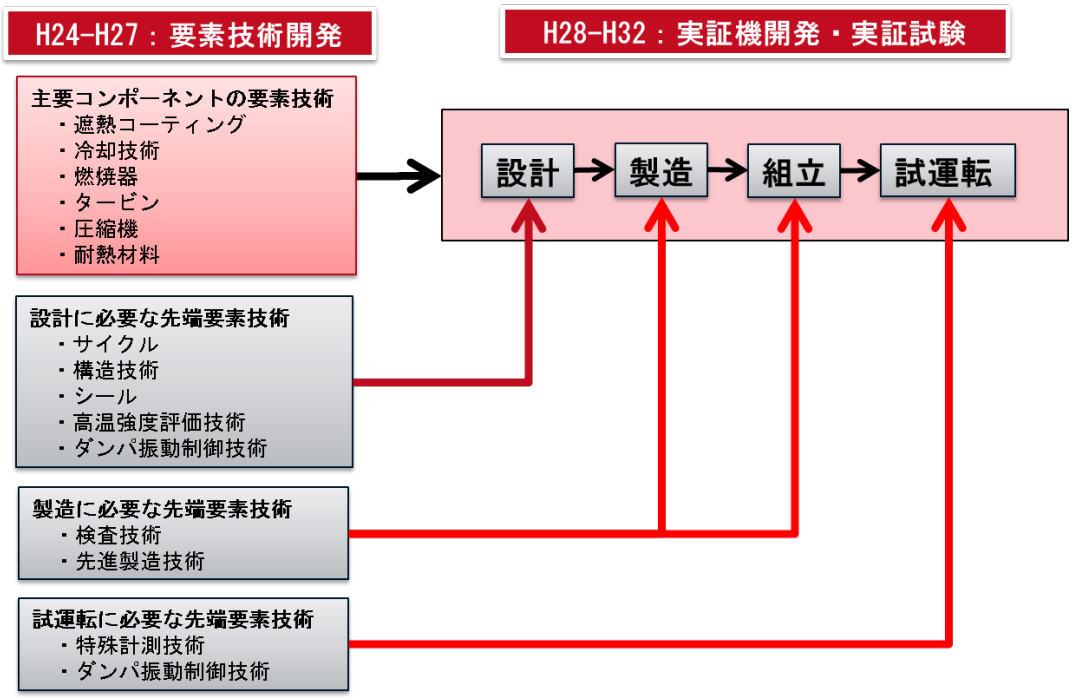


図４　要素技術開発と実証機開発・実証運転の関係

２．研究開発目標

２－１　研究開発目標

２－１－１　全体の目標設定

電力産業の保守高度化とリプレース需要にあった大容量機（コンバインド出力 40 万ｋW 以上）の高効率化を目指し、目標送電端効率 57%以上（HHV：高位発熱量基準）を達成するために必要な、1700℃級ガスタービンの技術開発を行い、実証試験により、実用化を図る。

H24 年度以降の事業では、技術開発の進展や 1600℃級ガスタービンの実績を通して、より効率を高められる可能性が高まったため、目標値を従前の 56%から 57%に改めるに至った。57%は、2020 年市場導入時に世界最高効率で、海外メーカーに確実に先行できる発電効率レベルである。

そのため、1700℃級ガスタービンの実用化に必要な以下の要素技術開発（事前技術検証）を行い、システムの成立性をシミュレーション等により確認する。

・低 NOx 燃焼器の開発
・高性能冷却システムの開発
・低熱伝導率遮熱コーティング（TBC：Thermal Barrier Coating）の開発
・高負荷・高性能タービンの開発
・高圧力比高性能圧縮機の開発
・超耐熱材料の開発

中間評価時点での目標は以下である（表１）。

表１．全体の目標

目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
発電効率５７％（高位発熱量基準、送電端）	発電効率５７％（高位発熱量基準、送電端）を達成するために必要な、要素技術の開発目標に向けて、解析や要素試験により、各項目の達成目途を得る。 また、要素試験の実施仕様を明確にして、準備を進める。	2020 年市場導入時に世界最高効率で、海外メーカーに確実に先行できる発電効率を目標とした。

２－１－２　個別要素技術の目標設定

個別要素技術の目標を表２に示す。

表２．個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
①低熱伝導率遮熱コーティング	遮熱性を+30%向上 （従来：1600℃級ガスタービン）	・厚さ 0.5mm 以上で試作し、熱疲労寿命が従来並みであることを確認する。 ・エロージョン試験装置製作および試験着手。	【超高温での遮熱性の大幅向上と、耐久性の両立】 ・遮熱コーティング厚 0.3mm（従来）⇒0.5mm 以上を狙う。一方で、熱疲労寿命は従来並みを確保する必要がある。 【エロージョン/コロージョンの発生防止】 ・発電用ガスタービン特有のエロージョン/コロージョンに対し、耐久性向上（従来比減耗量Δ50%）を実現する。 【大型 3 次元翼の高品質確保】 ・航空用ＧＴの 3 倍以上の大型翼で、溶射ガンの近接距離の制約が大きく、翼の熱変形も大きい条件下で、高品質な被膜を実現する溶射技術（または蒸着技術）を開発する。
②高性能冷却システム	冷却空気量を10%低減 （従来：1600℃級ガスタービン）	・実機燃焼器を上流に設置した状態でのタービン翼列の気流・伝熱試験による端壁面での詳細データ取得。	【冷却空気流量の大幅削減】 ・ガス温度を約 100℃高めつつ、従来より少ない冷却空気流量で、高温部品の金属表面/コーティング表面の温度レベルを、従来並みに抑える冷却構造を開発する。 【複雑な現象の実験データ取得とシミュレーション技術の開発】 ・燃焼器下流の強い乱れの下で、翼表面近傍での高温ガス流れの挙動や、伝熱への影響を予測可能なシミュレーション技術を開発する。 局所流速精度　±10%以内

			熱伝達率精度　±30%以内 ・冷却翼の内部冷却通路内の流れと、翼外部の高温ガス流れの連成効果を考慮し、最大限の冷却効果を得る伝熱評価/冷却設計技術を開発する。 圧力予測精度　±10%以内
③非定常性制御燃焼技術	NOx 40ppm（排ガス再循環有り） （従前の目標は 50ppm） 50ppm（排ガス再循環無し）	・排ガス再循環有の条件で、NOx　40ppm 以下を確認した。 ・レーザーによる気流計測による燃焼器内気流データの取得。 ・レーザー計測による実機燃焼器形態での火炎形状の把握。 ・火炎形状と圧力変動計測を同時計測し、燃焼を不安定にする領域を特定する。	【排ガス再循環を最小限として、超高温での低 NOx 化を実現】 ・排ガス再循環を最小限（従来 30%⇒5%～0%）とした条件で、NO x 50ppm を達成する燃焼制御技術を開発する。 【超高温での不安定燃焼発生防止】 ・サイクルの高圧力比化に伴い燃焼用空気温度が高くなる（従来 450℃⇒500℃程度）場合の、燃料の自己着火や逆火などの発生防止。 【燃焼振動の発生メカニズムの理解と発生防止】 ・燃焼振動現象のメカニズムの解明と、評価技術の開発を行う。 ・車室や、流体/燃焼の影響を考慮した音響特性のシミュレーション技術を開発する。 【燃料多様化技術】 ・超高温燃焼で顕著となる燃料成分変化の影響を把握するとともに、油燃料も使用可能な燃料ノズルを開発する。
④超高性能タービン	一軸タービンで、効率 92%以上 （従前の目標は 91%以上）	・タービン効率向上コンセプトの抽出 ・高速回転試験装置により、排	【超高温・高負荷条件での高効率の実現】 ・従来並みの 4 段もしくは 5 段で、目標効率 92%を達成する空力設計技術を開発する。

		気ディフューザの改良効果として、排気の流体損失 50%低減を確認する。 ・モデルタービン試験データによる、動翼-静翼間の翼列干渉効果による励振力の評価メカニズムの考察	【排気損失低減】 ・ガスタービン出口から排熱回収ボイラまでの流体損失を最小とするディフューザコンセプトを開発する。 圧力損失を従来比Δ50% 【シール空気量を低減】 ・高温ガスの混入を防ぎつつ、従来より 10%以上シール空気を低減する流動制御技術を開発する。 【超高負荷での励振力低減】 ・タービン翼に加わる流体変動力が数 10%大きくなるため、励振メカニズムを解明し、励振力の低減を図る。従来比Δ10%。
⑤境界層制御高性能圧縮機	一軸圧縮機で、圧力比約 30 効率 90%以上 （従前の目標は 89%以上）	・モデル圧縮機試験により、前方段の負荷を約 10%高めた条件で、段効率+1%向上を確認する。 ・中後方段に対し、モデル圧縮機試験により、多段条件での動翼チップクリアランス流れデータを取得・評価する。 ・多段モデル圧縮機試験装置の計画、設計	【一軸圧縮機で高圧力比 30 程度の高効率を実現】 ・発電用一軸 15 段程度で、圧力比約 30 の高圧力比を実現する。 ・高圧力比・多段条件での損失発生メカニズムを考察し、最適な境界層コントロールなどにより 3 次元翼形状を開発し、損失を低減する。 効率　90%以上 【一軸・高圧力比圧縮機の安定な起動特性の確保】 ・従来に比べ、起動時に旋回失速やサージなどの不安定事象が発生しやすい。シミュレーション技術の開発適用により、安定な起動特性を実現する。 ※1600℃級 GT 圧縮機から 1700℃級 GT 圧縮器を更に開発する理由 : 1700℃級 GT は 1600℃級に比べ圧力比が高くなるため、圧縮機の効率向上や安定した起動特性の確保

			が難しくなる。このような高圧力比かつ１軸 GT にて両者を両立するためには、更なる研究開発が必要である。
⑥超高性能サイクル	発電効率 57%以上（高位発熱量基準、送電端）を達成可能なシステム構成を考案する。 （従前の目標は 56%以上）	・発電効率 57%以上のサイクルを実現するための、エクセルギ分析・評価	【エクセルギ分析による効率最大化】 ・エクセルギ理論を活用した新しい視点でのプラント効率最大化技術を開発する。 ・2020 年時点で、欧米他社を確実にリードできる 57%を目標とする。 【超高性能サイクル最適化】 ・現状世界最高の 1600℃級ガスタービンのデータを活用して、超高性能サイクルを実現する。
⑦高機能構造技術	クリアランス周方向偏差 1.0mm 以下	・構造コンセプトの比較検討 ・1600℃級ガスタービンにおける詳細クリアランスデータの取得に向けた準備	【超高温構造の熱変形の制御】 ・回転部と静止部の隙間（クリアランス）を、直径４ｍ以上の車室において、周方向偏差が殆どない状態（1.0mm 以下）で制御する技術を開発する。 ・半割れ構造の車室の変形制御技術を開発する。 周方向偏差 1.0mm 以下
⑧高性能シール	・従来ラビリンスシールに比べもれ量を 1/3 に低減 ・シール空気量 10%以上低減	リーフシールの適用に向けた基礎試験データ取得	【大変形追従型高性能シールの開発】 ・従来は適用が難しいとされていた大変形部に採用可能な、大変形追従型高性能シール技術を開発する。
⑨先進製造技術	・長穴加工 L/D>250 （従前の目標 L/D>200） ・孔位置誤差 1.0mm 以下	・長穴加工 L/D>250 ・溶接変形の 20%以上低減 ・高強度の中子・鋳型の候補	【タービン長翼の細部を冷却する長穴加工技術】 ・タービン長翼の前縁/後縁のような薄肉部を冷却可能な長穴加工を高精度（1.0mm 以下）で可能とする製造技術を開発する。

	・溶接時の変形50%以上低減 ・鋳造歩留り90%以上	材抽出	【溶接時の変形低減技術】 ・航空用エンジンの 3 倍以上の大きさがあり、溶接時の変形がガスタービン組立時の各部隙間の原因となっている。溶接変形の予測可能なシミュレーション技術を開発し、変形低減する溶接施工法を開発する。 変形を従来比 50%以上低減 【精密鋳造技術の品質確保】 ・大型の精密鋳造翼の形状精度を確保するために、中子（セラミクススコア）や鋳型の強度を向上するために、新しい素材を探索・開発する。 ・従来に比べ複雑かつ大型の精密鋳造翼では、鋳造条件のコントロールが難しくなるために、鋳造欠陥や強度不足が発生しやすくなる。品質確保のためにシミュレーション技術を駆使して、量産可能なレベルに鋳造技術を高度化する。
⑩超高温強度評価技術	方向凝固翼の強度評価手法の構築	・高温域での設計に向けた材料データの取得 ・超高温域長時間使用後の健全性確認のための材料データ取得に着手	【方向凝固翼の強度評価技術の確立】 ・超高温ガスタービンの冷却翼に用いられる方向凝固翼（単結晶、一方向凝固翼）では、設計応力が高く、結晶方位の局所応力への影響などを無視できなくなる。 ・クリティカル部位（フィルム孔回りや形状の変化が大きい部分）の高温強度評価技術については、一般的な評価手法では十分な評価ができない。このため、設計/運用条件や製造方法などを考慮した総合的な評価手法が必要である。

⑪特殊計測技術	高温部計測センサーの耐用時間 100hr 以上	・高温での動翼振動計測の開発と実機計測 ・高温での動翼チップクリアランス計測準備	【特殊計測用センサーの開発】 ・超高温ガスタービンでは、従来に比べ高温/高圧/高流速であり、試運転時に必要不可欠な以下の計測技術・センサーは、現状のままでは使用できない。 ・燃焼ガス温度計測 ・タービン翼の表面メタル温度計測（放射温度計） ・クリアランス計測 ・動翼振動計測 それぞれが実機で使用可能なレベルの信頼性を確保する技術開発を行う。
⑫高精度・高機能検査技術	翼内面の複雑形状部の欠陥検知 0.5mm 以下	・センサ試作 ・試計測により、0.5mm のき裂に対し、検知可能であることを確認する。	【タービン翼の内面の欠陥検知技術】 ・冷却構造が従来に比べ複雑になるため、製造時や運転後の検査において、特にタービン翼のクリティカル部位における欠陥検知が必要となる。このために、複雑形状に適用可能で、高精度な欠陥検知技術を新たに開発する。
⑬高性能ダンパ振動制御技術	翼振動数のバラツキ 50%低減	・ダンパの基礎試験を実施し、振動数やダンピングの基礎データを取得する。	【バラツキの小さいダンパ技術】 ・超高温ガスタービンでは、励振力自体が従来に比べ大きくなるため、確実な共振回避と一定レベル以上のダンピング確保を可能とする高性能ダンパ・振動制御技術を開発する。

３．成果、目標の達成度

３－１　成果

３－１－１　全体成果

９年間の最初の４年間は、実証機開発の成功確率を高めるために、以下のような基礎的な要素基礎研究を中心に技術開発を行っている。

（１）1700℃級ガスタービンの主要コンポーネント（圧縮機、タービン、燃焼器）の完成度を高めるための要素技術研究

（２）主要コンポーネント以外ではあるが、ガスタービン全体のインテグレーションとして必要な機械要素や技術要素について、1700℃級での実機作動に耐えられる必要不可欠な性能向上や信頼性向上を実現するための、基礎研究

（３）実証機を製作・運転を支える周辺技術であり、ガスタービンに特化して研究開発が必要な、製造技術や計測技術などの基礎研究やセンサー開発

これらは、事象のメカニズムが不明なものが多く、基礎研究としてリスクが高い技術開発が全体の殆どを占める。

1 年半の研究の中間段階としては、すべての項目で順調に進捗しており、予定通り、平成 28 年度から実証機の開発、実証に向けた準備に着手できる予定である。

３－１－２　個別要素技術成果

（１）低熱伝導率遮熱コーティング

【超高温での遮熱性の大幅向上と、耐久性の両立】

・遮熱コーティング厚 0.3㎜（従来）⇒0.5㎜ 以上と厚膜としつつ、熱疲労寿命は従来並みを狙う。

【エロージョン/コロージョンの発生防止】

・発電用ガスタービン特有のエロージョン/コロージョンに対し、耐久性向上（従来比減耗量Δ50%）を実現するために、より緻密な組織を実現するための溶射条件を検討中である。シミュレーションが難しい技術分野であり、基礎データ取得のため、高温高速エロージョン試験装置を新たに開発・製作した。

・航空用ＧＴの 3 倍以上の大型翼で、溶射ガンの近接距離の制約が大きく、翼の熱変形も大きい条件下で、高品質な被膜を実現する溶射技術（または蒸着技術）が必要となる。

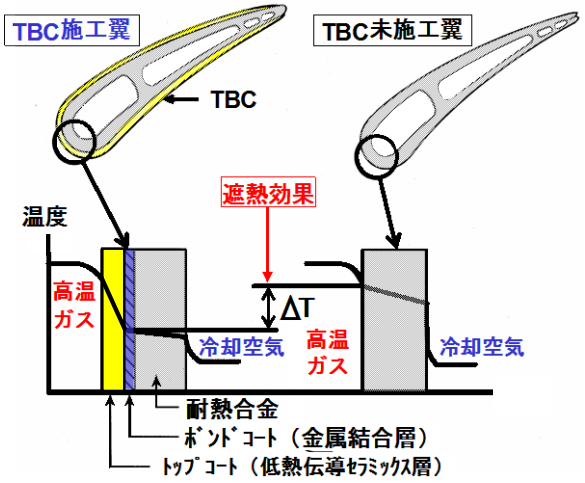


図５　遮熱効果のイメージ

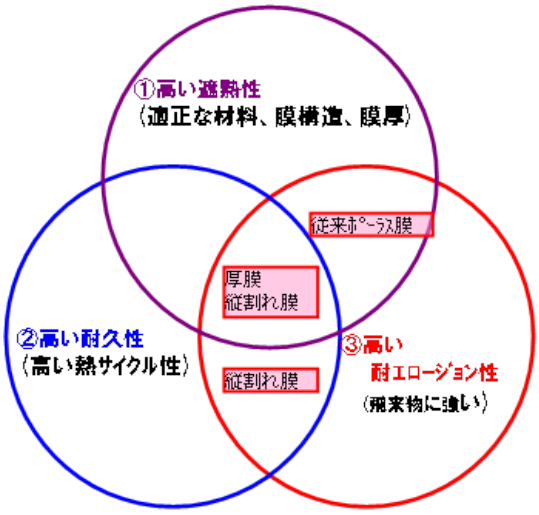


図６　遮熱コーティングに要求される機能

図７　溶射状況の高速度カメラ撮影

図８　高温高速エロージョン試験装置

（２）高性能冷却システム

実機燃焼器を上流に設置した状態でのタービン翼列の気流・伝熱試験を実施し、シュラウド面（端壁面）での詳細データを取得した。特に壁近傍で渦や乱れの強い領域での境界層（壁面からの距離が 2-3mm 以内の領域の流れ）を詳細計測し、捩れ境界層が熱伝達率に与える影響を、微視的に調査検討した。

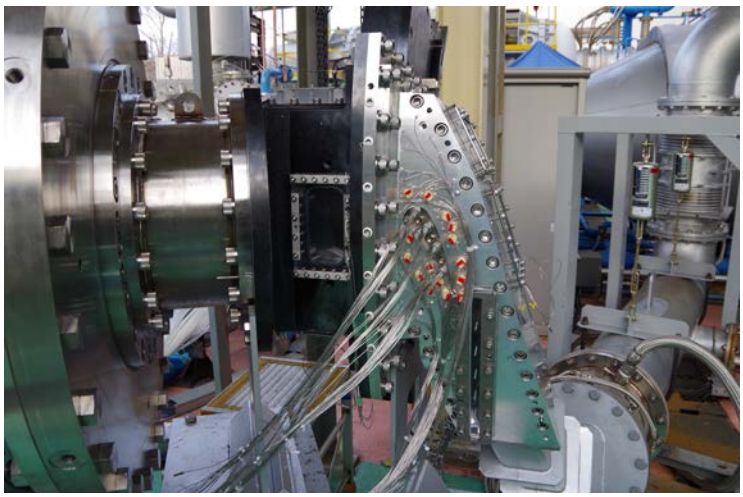


図９　　燃焼器-タービン第一段静翼で構成される、
燃焼ガス流れ詳細計測試験装置

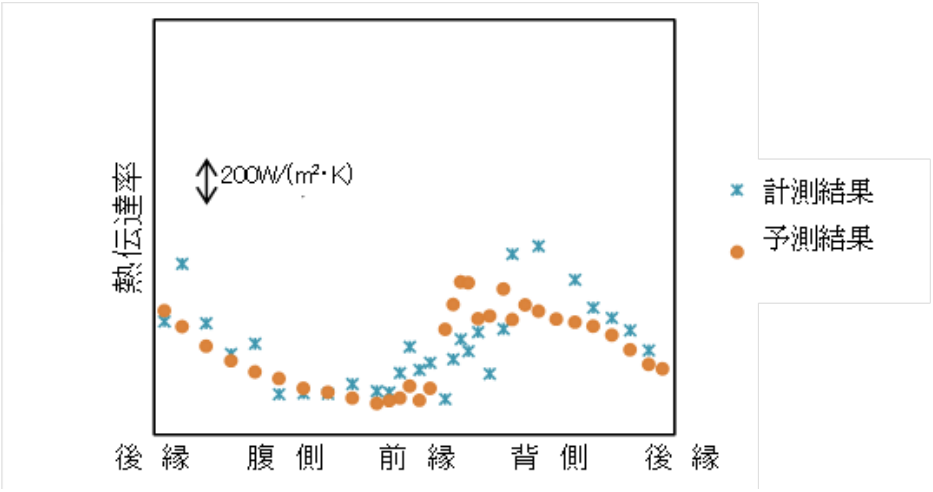


図１０　外側シュラウド近傍の翼面熱伝達率分布

（３）非定常性制御燃焼技術

・更なる低 NO x 化を目指して、レーザー気流計測による燃焼器内流速・乱れデータを取得した。

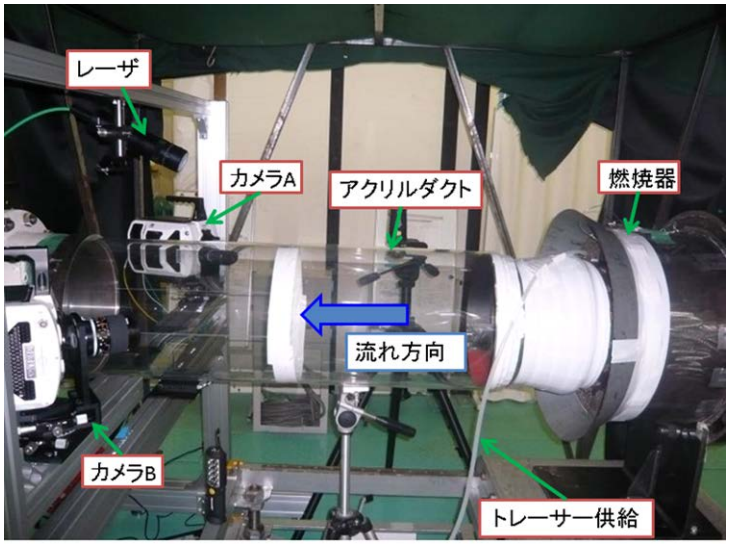


図１１　　ステレオＰＩＶの計測状況
（ＰＩＶ：Particle Image Velocimetry）

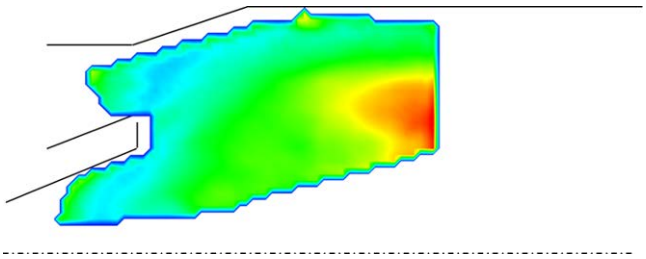


図１２　ステレオＰＩＶによる計測事例
（燃焼器内の半径方向の瞬時流速分布）

燃料が燃焼反応する際に生じるＯＨラジカルをレーザーを用いて計測した。これを計測することにより、燃焼領域を特定することができる。この手法を用いて、実機燃焼器形態での火炎形状（時々刻々変化している火炎形状の瞬時の形状）を計測・把握した。

・火炎形状と圧力変動を同時計測し、両者の変動の位相関係を分析することにより、燃焼を不安定にする領域を特定した。

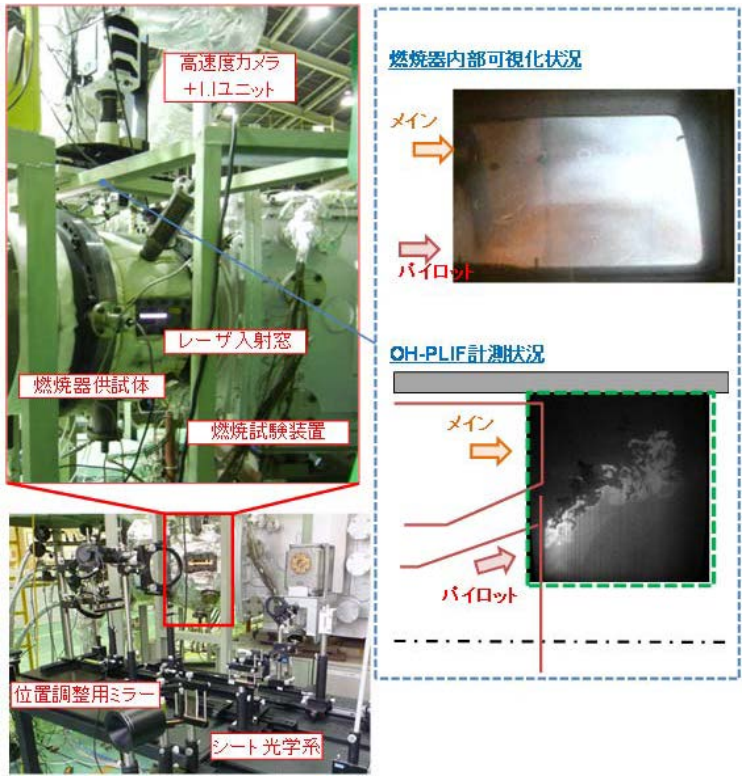
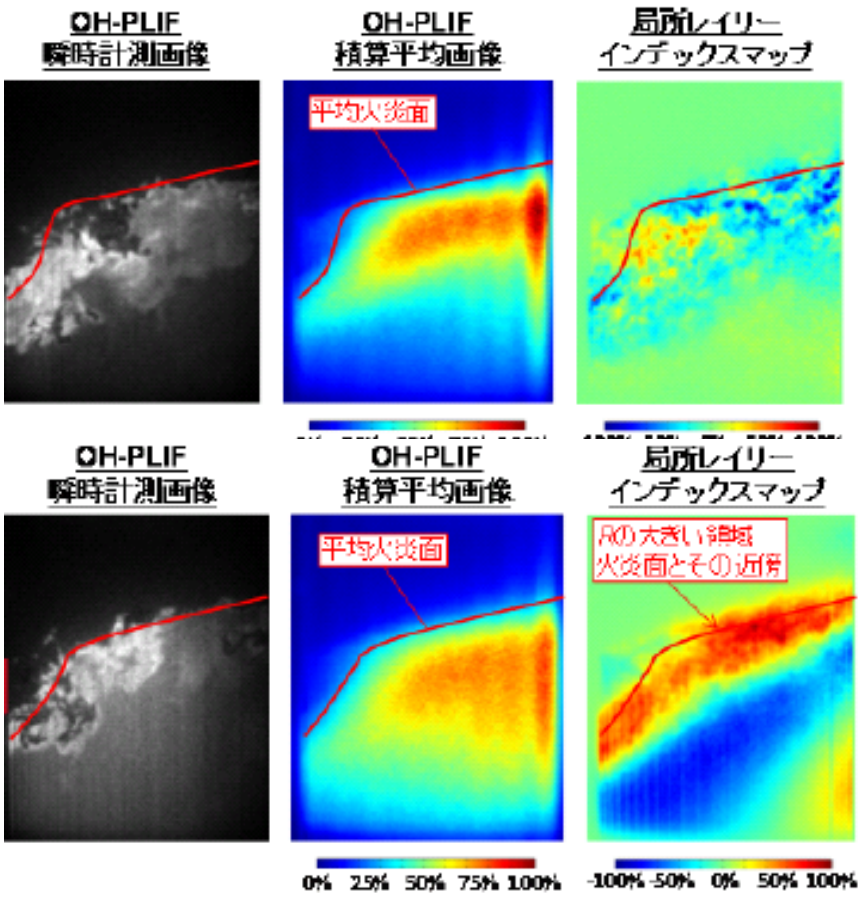


図１３
実燃焼器でのレーザーによる
火炎計測状況
（図中　I.I：
Image Intensifier）



上：安定燃焼時

下：燃焼振動発生時
（不安定燃焼時）
右の赤い部分が
不安定燃焼領域
（レイリーインデックス
とは、安定/不安定を
示す指標）

図１４　　燃焼を不安定にする領域の特定

（４）超高性能タービン

・タービン効率向上コンセプトの抽出を行い、それらを反映したタービンの試設計を行い、流動解析により効率向上効果を確認した。

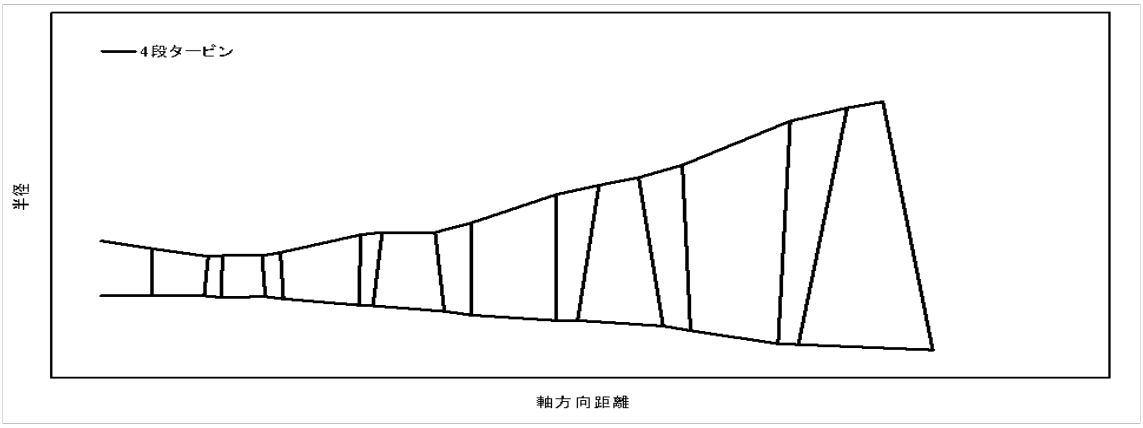


図１５　　試設計タービン形状

排気ディフューザについても性能向上案を抽出し、高速回転試験装置を用いた改良形状の空力試験を実施し、効果を確認した。

排気損失を従来比でほぼ半減する効果を確認できた。

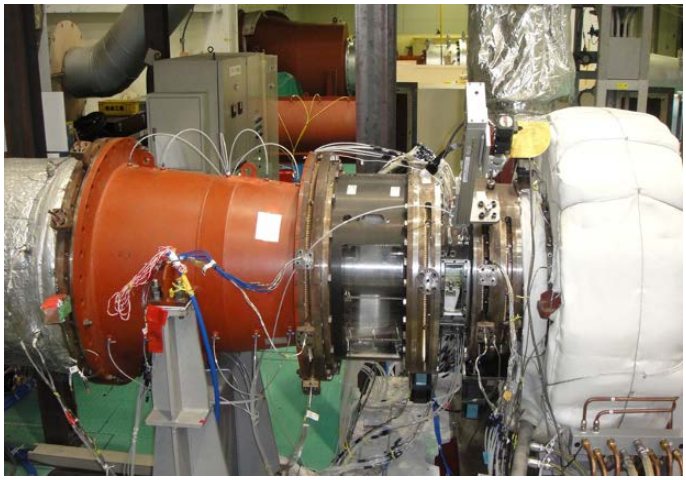


図１６　ディフューザ試験装置（上）

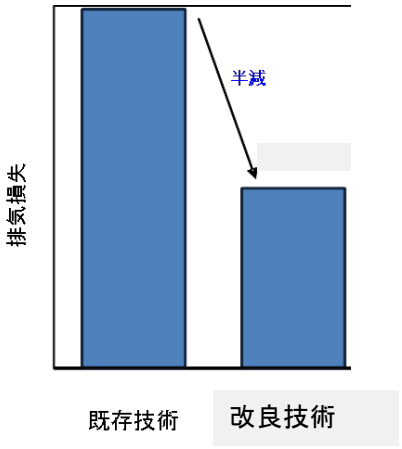


図１７　排気損失低減効果（右）

1700℃級の高負荷条件では、従来より大きな流体加振力が動翼に加わる。
また、高速回転試験装置を用いたモデルタービン試験で、回転している動翼の翼面上の圧力変動を詳細計測し、動翼-静翼間の翼列干渉効果により生じる動翼の励振力（動翼に加わる加振力）の発生メカニズムを考察・評価した。
その結果、翼面圧力変動の、振幅・位相のいずれも、流動解析で、精度良く予測可能となった。

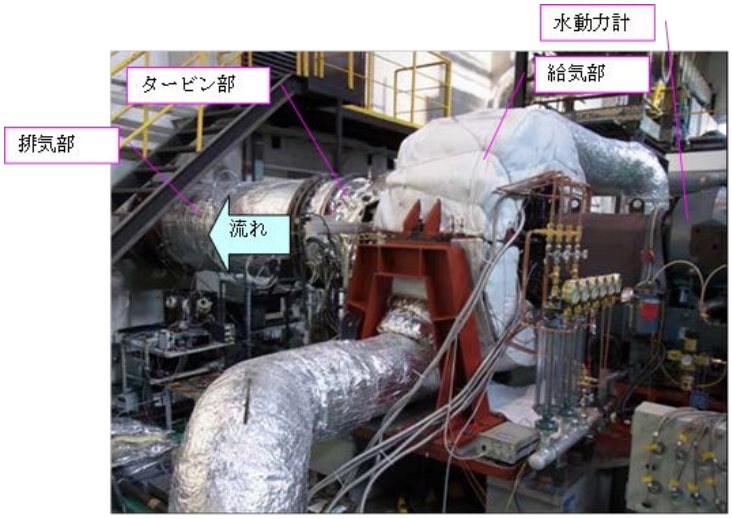


図１８　　高速回転翼列試験装置

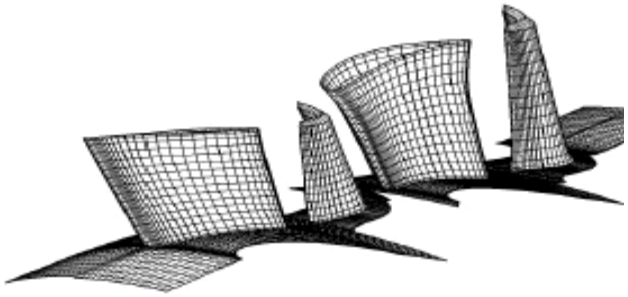
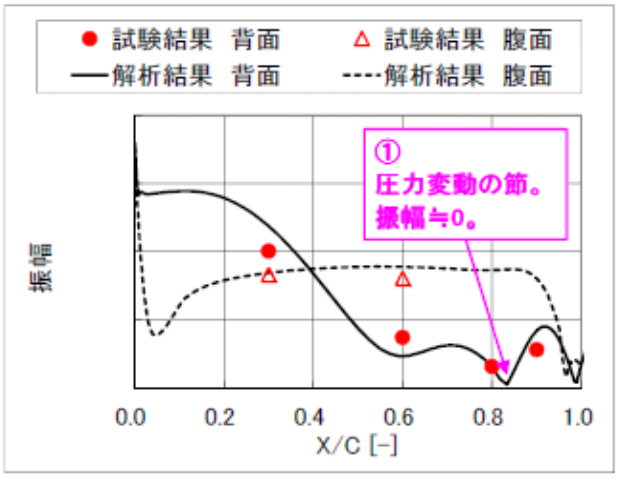


図１９　流動解析用メッシュ
（メッシュは間引いて表示）



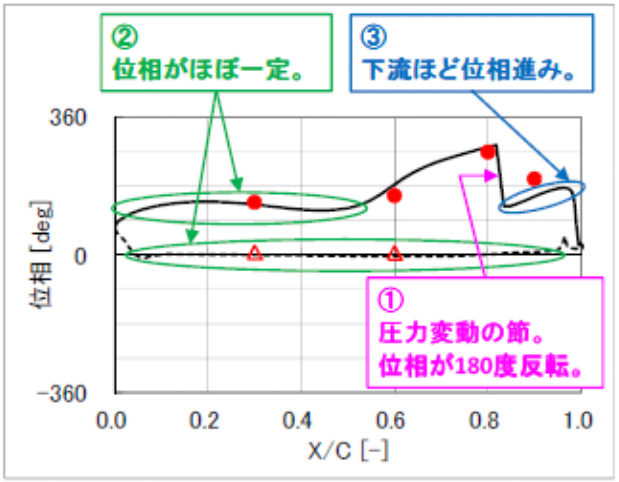


図２０　１段動翼の圧力変動データ
計測値と解析値の比較
上：振幅、下：位相

Fig.3　1 段動翼 Mean 断面の翼面圧力変動

（５）境界層制御高性能圧縮機

・高速回転試験装置を用いた前方段モデル圧縮機試験により、設計点での段圧力比を約１０%高くし、スパン方向の圧力比の分布をよりフラットにすることにより、1%以上の段効率向上の目途を得た。

図２１　　圧縮機前方段の高速回転試験装置

・高速回転試験装置を用いた中後方段モデル圧縮機試験により、多段圧縮機で上流から境界層などが蓄積された条件で、動翼先端部と静止部（ケーシング）との隙間の流れ（クリアランス流れ）を、高応答圧力センサなどを用いて、詳細計測した。

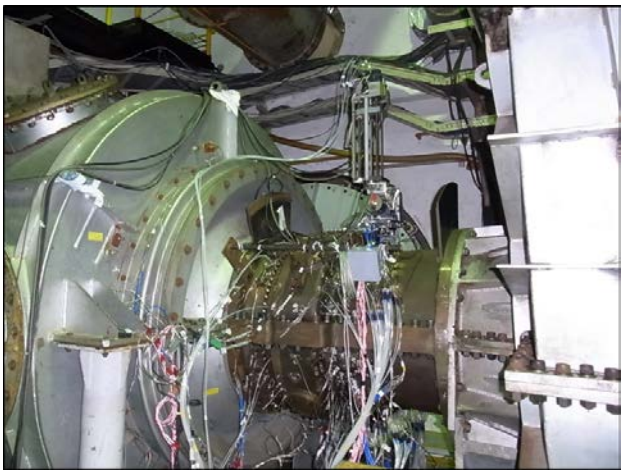


図２２　圧縮機中後方段の高速回転試験装置

・さらに、従来より段数を増やし、入口案内翼や可変静翼、抽気室など備えた多段モデル圧縮機試験装置の計画、設計を実施し、一部製作に着手した。

（６）超高性能サイクル

エクセルギ理論を活用し、プラントの各コンポーネントにおけるエクセルギー損失を定量評価した。損失低減策を検討し、プラント構成や圧力・温度などの条件を最適化することにより、効率の最大化を図る。

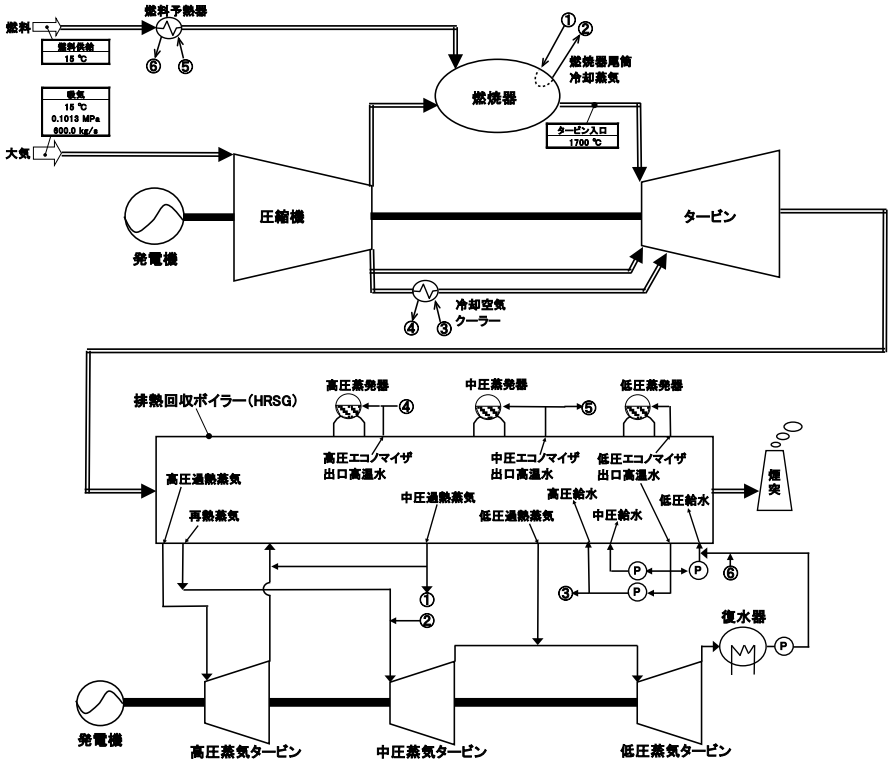


図２３　　解析対象のコンバインドサイクル

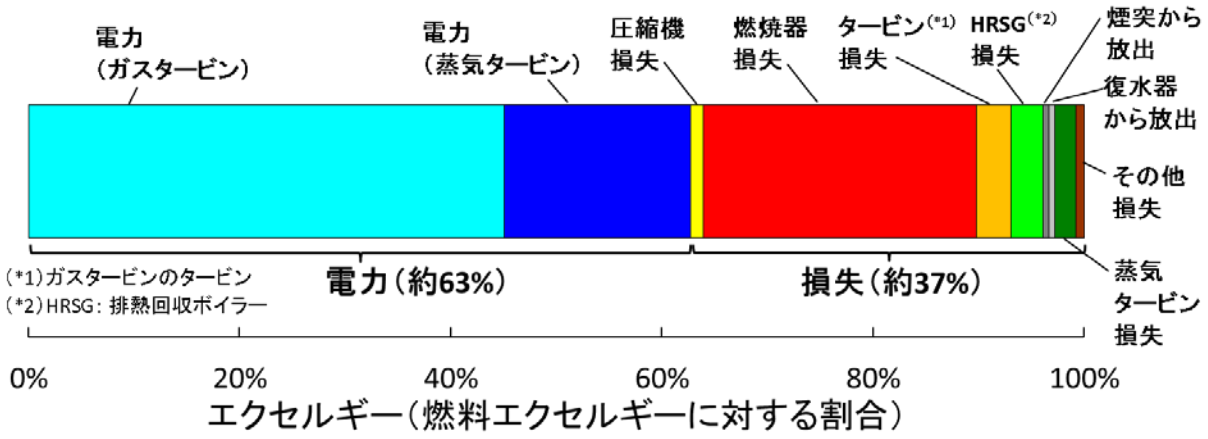


図２４　　燃料エクセルギーを 100%とした場合の、プラントのエクセルギー分析結果

（７）高機能構造技術

直径約４ｍのケーシングは、数ｍｍ～１０ｍｍ以上の熱変形が発生する。この変形量を制御し、回転方向に均一な回転系部品と静止系部品との隙間（特に、圧縮機やタービン翼の先端のチップクリアランス）を確保するための構造案を検討中である。

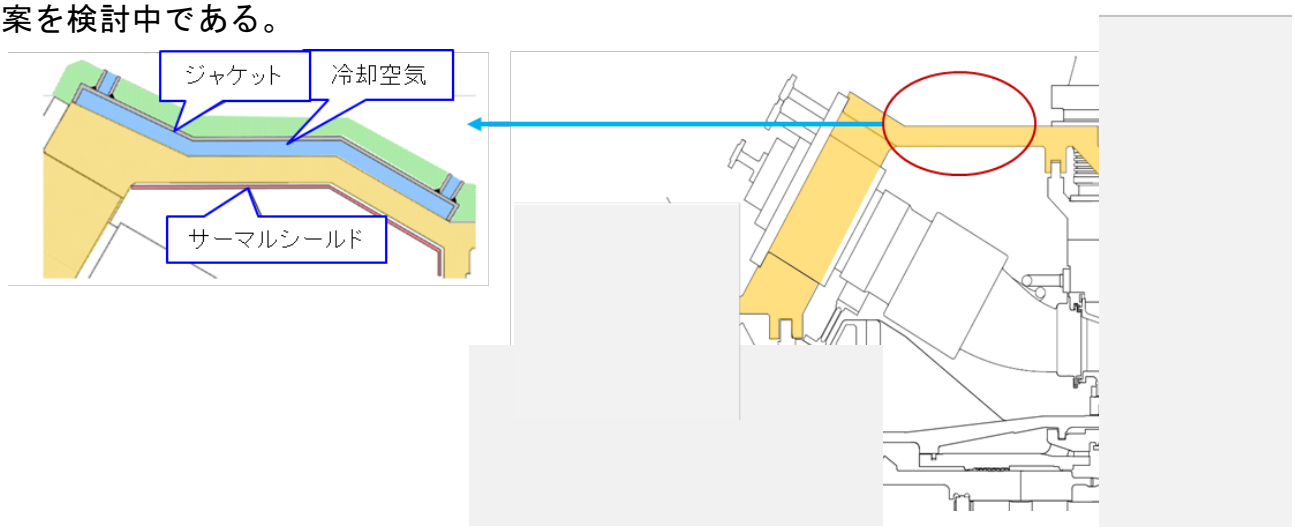


図２５　　チップクリアランス低減のための、構造検討事例

（８）高性能シール

回転系部品（ロータなど）と静止系部品（翼環やケーシングなど）との隙間（クリアランス）は、高温作動時に熱変形などにより数ｍｍ～１０ｍｍ以上も変形し、漏れ空気が大きくなってしまう。このため、両車の大変形に追従する高性能シールとして、リーフシール（金属の薄板を多層に重ねた高性能シール）の開発のために、以下の試験装置を製作し、試験実施中である。

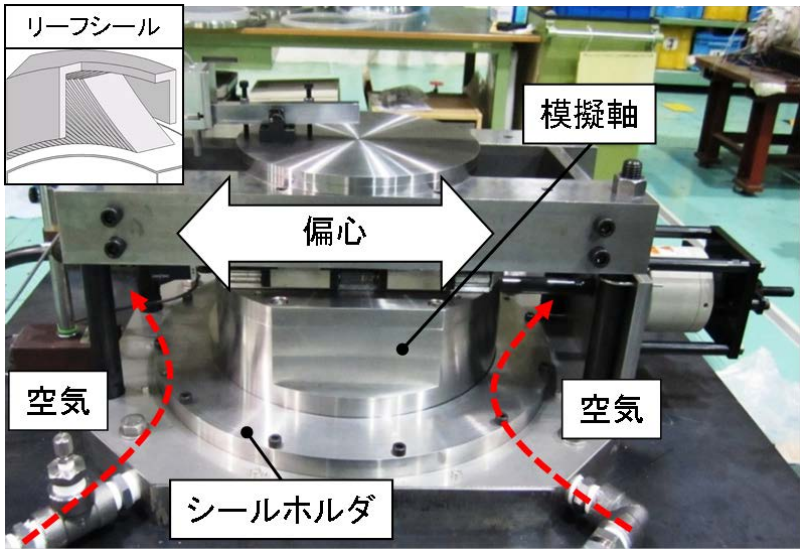


図２６　　リーフシール特性試験装置

（９）先進製造技術

方向凝固翼（単結晶翼および一方向凝固翼）の精密鋳造時の結晶性欠陥を抑制するためには結晶健全性改善を狙った高強度（薄肉化）鋳型の開発が不可欠である。計算材料シミュレーションにより、セラミックスの特性予測を行い、試作候補組成の抽出を行う手法を構築した。

複数候補材の組成について、鋳型原料調整・スラリー調整条件等決定し、特性評価用鋳型試験体の製作プロセスを構築した。

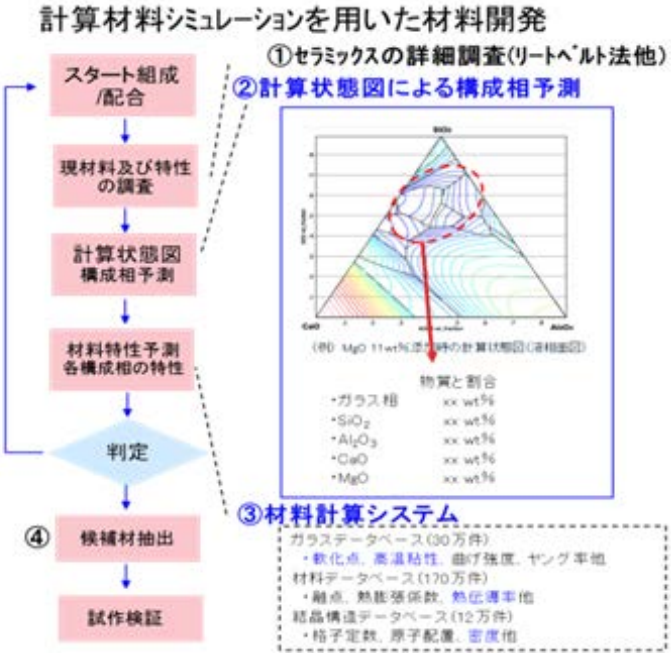


図２７　　材料シミュレーションを用いた材料開発

ガスタービンを構成する部品は複雑な形状のものが多く、溶接組立が製造プロセスとして多用される。一例として、安定した施工が可能なレーザー肉盛溶接工法の静翼冷却通路への適用と、条件最適化により、変形を低減する形状や溶接条件を検討し、変形を 20%低減する目途を得た。

図２８　冷却通路の溶接状況（レーザー工法）

（１０）超高温強度評価技術

タービン翼など高温部品のメタル温度が上昇するため、高温で長時間使用された場合の材料強度を含め、材料強度に対し、従来より緻密な、設計評価が必要となる。このため、以下の二項目の主催データ取得を実施している。

・高温域での設計に向けた材料データを取得（表３）

・高温域での長時間使用後の健全性確認のための材料データ取得（表４）

表３　引張試験・熱疲労試験・高サイクル疲労試験マトリックス

（高温域での設計に向けた材料データの取得）

材質	温度		
	700℃	900℃	1000℃
方向凝固材 0°	●	●	●
方向凝固材 90°	●	●	●
普通鋳造材	●	●	●

表４　超高温域長時間使用後の健全性確認のための材料データの取得

加熱時効条件				試験種類	材料
時効温度（℃）	時効時間				
	無	3000～5000h	10000～20000h		
800	●	◎	○	熱疲労（LCF）	（動翼材）普通鋳造材 方向凝固材 0deg/90deg （静翼材）普通鋳造材
900		◎	○		
950		◎	○		
1000		◎	○		
900	●	◎	○	疲労（HCF）	
1000		◎	○		
800	●	◎	○	引張硬さ	
900		◎	○		
950		◎	○		
1000		◎	○		
800	●	◎	○	組織観察	
900		◎	○		
950		◎	○		
1000		◎	○		

●：H25 年度取得済、◎：H25 年度取得予定、○：平成 26 年度以降取得予定

（注：単結晶材については、別途データ取得中）

（１１）特殊計測技術

1700℃級の超高温条件では、試運転時に必要不可欠な計測項目（燃焼ガス温度／タービン翼の表面メタル温度／回転動翼と静止しているケーシングとの隙間（チップクリアランス）／回転動翼の振動）に対して、従来の計測技術やセンサーでは、耐久性などが問題となり正確なデータを計測することが困難となる。これらに対し、実機で使用可能とするための技術開発として、センサの開発や計測技術の改良などを行う。

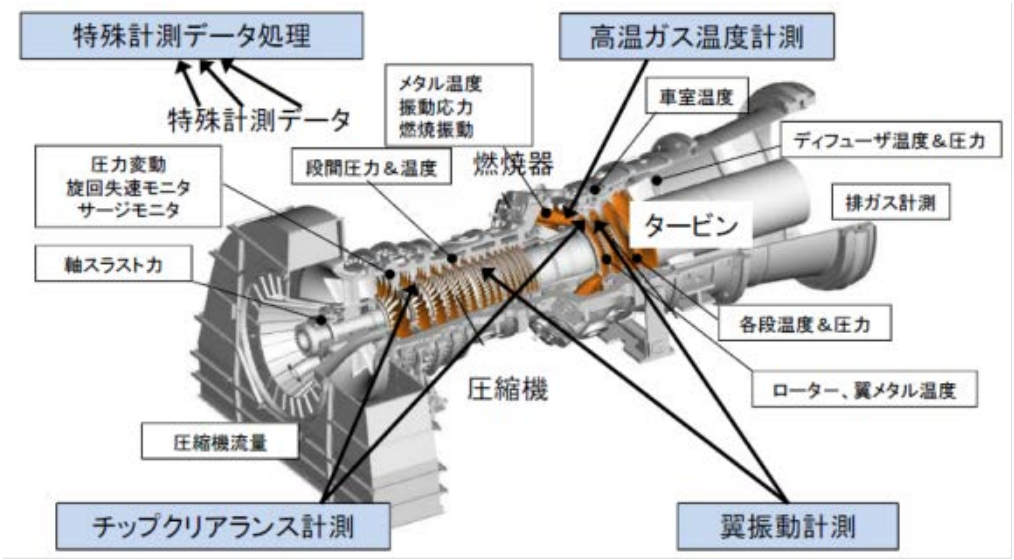


図２９　　実証機での特殊計測項目例（一部）

図３０　　ファイバー式ガス温度計測プローブ

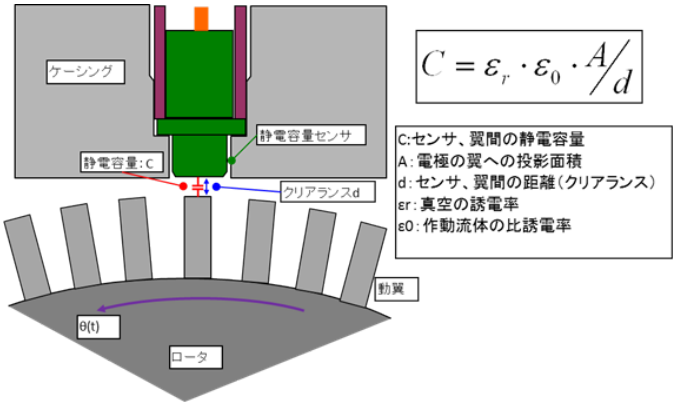
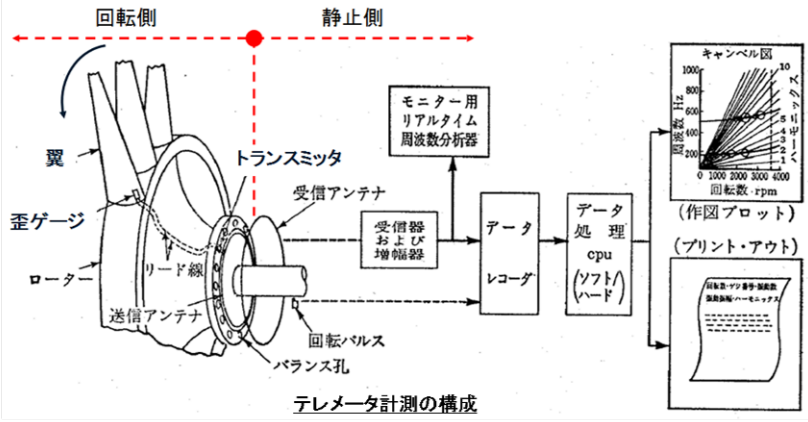


図３１　　チップクリアランス計測概要

高温タービンの非接触翼振動計測技術を、1600℃級Ｊ形ガスタービン実機のタービン第一段動翼で、試計測を行い、手法の妥当性を確認した。

（従来）テレメータ計測では、動翼にひずみゲージを貼り付け、リード線をロータ端に取り出して、テレメータで計測していた。



（新）センサを静止側に設置し、動翼の振動を非接触にて計測
歪みゲージに匹敵する精度で回転中の全動翼の振動数、振幅、位相を計測することが可能

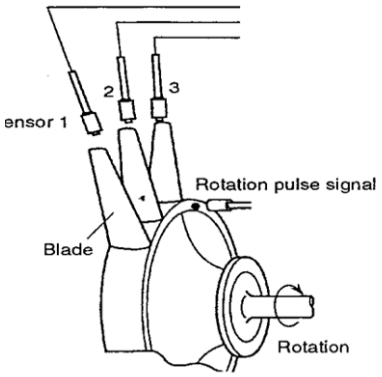


図３２　　高温タービンの非接触翼振動計測技術

（１２）高精度・高機能検査技術

φ０．７ｍｍの細径ファイバースコープと蛍光剤によるき裂強調手法で、実翼を模擬した冷却孔付近の約０．５ｍｍのき裂検出ができることを確認した。

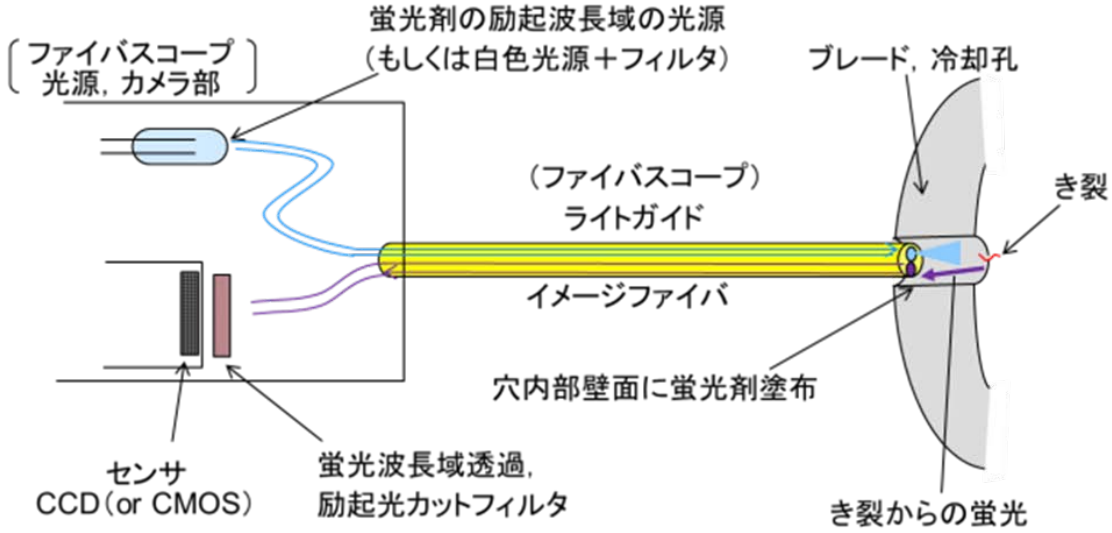


図３３　　ファイバースコープによるき裂蛍光観察のイメージ

（１３）高性能ダンパ振動制御技術

超高温ガスタービンでは、タービン動翼に加わる流体加振力自体が、従来に比べ大きくなるため、確実な共振回避と一定レベル以上のダンピング確保を可能とする高性能ダンパ・振動制御技術が必要となる。

隣り合うタービン動翼間に設置されるダンパの基礎試験として、しゅう動試験装置によるダンパ接触特性取得、及び、非接触加振による模擬翼の振動特性取得試験を実施し、振動数やダンピングの基礎データを取得した。

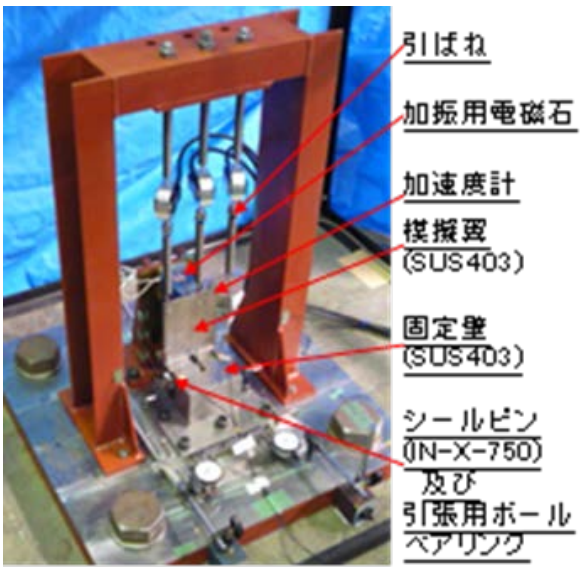


図３４　　非接触加振による模擬翼の振動特性取得

３－１－３　特許出願状況等

表彰、特許、論文、投稿、発表回数などを以下に示す。
本事業開始後約１年半で、国内外の電力会社などに 70 回のご視察を頂いた。

表５．特許・論文等件数

要素技術	表彰	論文	投稿	発表	特許	電力会社ご視察
件数	１件	６件	７件	15 件	22 件	70 回

表６　　表彰・論文・投稿・発表などのリスト

	題目・メディア等	時期
表彰	産官学連携推進会議　日本経団連会長賞 「1700℃級ガスタービン　冷却技術の開発」	H25.9
論文		
	日本ガスタービン学会誌　第 40 巻 6 号「ガスタービンの主要コンポーネントや吸排気のＣＦＤと最適化」	H24.11
	三菱重工技報 Vol.50 No.1 (2013) 新製品・新技術特集 「1700℃級ガスタービン排ガス再循環による低 NOx 燃焼器システムの開発」	H25.1
	日本ガスタービン学会誌 「発電用ガスタービンの高温・高効率化の進展と将来展望」	H25.1
	電気協会報　「超高温ガスタービンの現状」	H25.1
	日本ガスタービン学会誌 「タービンにおける可視化技術の活用」	H25.8
	三菱重工技報 Vol.50 No.3 (2013) 発電技術特集「 1600℃級Ｊ形技術を適用した発電用高効率ガスタービンの開発」	H25.9
	・・・・	
投稿		
	日刊工業新聞社　「進化する火力発電」	H24.10
	電気新聞「長期実証 8000 時間超え、Ｊ形高信頼性を実証」	H24.12
	電気新聞「空冷式Ｊ形商用化」	H24.12
	NEDO　HP　「NEDO ドキュメントサイトシリーズ」	H24.12
	電気新聞「台湾から GTCC 受注」	H25.9

	電気新聞「最新鋭火力の建設、MACCⅡプロジェクト」	H25.9
	MPSA プレスリリース「J-Series Update」	H25.9
発表	日本ガスタービン学会 40 周年記念講演会 「産業用ガスタービンの最新技術動向と展望」	H24.4
	13th World Conference on Investment Casting & Exposition 「 Hot parts of MHI industrial gas turbine by precision casting 」	H24.4
	ASME TurboExpo2012 「 Future Gas Turbine Products and Their Enabling Technologies」	H24.6
	Global R&D Forum 2012 「MHI status and Trends of Gas Turbine」	H24.7
	ACGT 「Yesterday, Today and Tomorrow of Gas Turbines 」	H24.8
	日本金属学会 H24 年度秋季大会 「γ’相析出強化型 Ni 基合金の開発・実用化」	H24.9
	第 40 回日本ガスタービン学会定期講演会「1700℃級ガスタービン排ガス再循環システムの燃焼器開発」	H24.10
	日本ガスタービン学会 2012 年度ガスタービンシンポジウム パネルディスカッション	H24.10
	日本溶射学会 中部支部第 11 期・第 8 回溶射技術研究会 「高温環境への溶射技術適用」	H25.3
	日本材料学会 第６１期第５回 高温強度部門委員会 「高温ガスタービン用先進遮熱コーティングの開発状況」	H25.5
	ASME TurboExpo2013 「 Future Gas Turbine Products and Their Enabling Technologies」	H25.6
	第 41 回日本ガスタービン学会定期講演会 「高温ガスタービンタービン動翼の振動強度検証」	H25.10
	第 41 回日本ガスタービン学会定期講演会 「ウェーク干渉を受けるタービン動翼の圧力変動評価」	H25.10
	第 41 回日本ガスタービン学会定期講演会 「ガスタービン燃焼器内の火炎変動可視化技術の開発」	H25.10
	The 3rd Annual Gas Turbine World China Summit 「 Key Technology Development for Next Generation High Temperature Gas Turbines (NGGT)」	H25.10

３－２　目標の達成度

研究開発の目標に対する達成度を以下に示す。現時点での中間目標は全て達成した。

表８．目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標 （中間評価時点）	成果 （中間評価時点）	達成度
①低熱伝導率遮熱コーティング	・厚さ 0.5mm 以上で試作し、熱疲労寿命が従来並みであることを確認する。 ・エロージョン試験装置製作および試験着手。	・厚さ 0.5mm 以上の成膜条件で、熱疲労寿命が従来並みであることを確認した。 ・エロージョン試験装置を製作し、試験に着手した。	達成
②高性能冷却システム	・実機燃焼器を上流に設置した状態で、タービン翼列の気流・伝熱試験による端壁面での詳細データ取得。	・実機燃焼器を上流に設置した状態でタービン翼列の気流試験・伝熱試験による端壁面での詳細データを取得した。	達成
③非定常性制御燃焼技術	・排ガス再循環有の条件で、NOx　40ppm 以下を確認した。 ・レーザーによる気流計測による燃焼器内気流データの取得。 ・レーザー計測による実機燃焼器形態での火炎形状の把握。 ・火炎形状と圧力変動計測を同時計測し、燃焼を不安定にする領域を特定する。	・排ガス再循環有の条件で、NOx　16ppm を確認した。 ・レーザーによる気流計測による燃焼器内気流データを取得した。 ・レーザー計測により実機燃焼器形態での火炎形状を把握した。 ・火炎形状と圧力変動計測を同時計測し、燃焼を不安定にする領域を特定した。	達成
④超高性能タービン	・タービン効率向上コンセプトの抽出 ・排気ディフューザの改良を行い、排気の圧力損失を５０%低減する。 ・モデルタービン試験データによる、動翼-静翼間の翼列	・タービン効率向上コンセプトを抽出し、それらを盛り込んで試設計を行い、シミュレーションによりその妥当性を確認した。 ・高速回転試験により、排気ディフューザの形状変	達成

	干渉効果による励振力発生のメカニズムの考察	更の効果を確認、現状より５０%圧力損失低減を確認した。 ・モデルタービン試験により､動翼-静翼間の翼列干渉効果による励振力のデータを取得した。シミュレーションと比較することにより、現象のメカニズムを考察した。	
⑤境界層制御高性能圧縮機	・モデル圧縮機試験により、前方段の負荷を約 10%高めた条件で、段効率+1%向上を確認する。 ・中後方段に対し、モデル圧縮機試験により､多段条件での動翼チップクリアランス流れデータを取得・評価する。 ･多段モデル圧縮機試験装置の計画、設計	・モデル圧縮機試験により、前方段の負荷を約 10%高めた条件で、段効率+1%向上を確認した。 ・モデル圧縮機試験により、多段条件での動翼チップクリアランス流れデータを取得し、シミュレーションと比較することにより評価を行った。 ・多段モデル圧縮機試験装置の計画、設計を実施し、一部製造に着手した。	達成
⑥超高性能サイクル	･発電効率 57%以上のサイクルを実現するための､エクセルギ分析・評価	・基本的なサイクル構成にて熱サイクル評価を行い、発電効率 57%以上の達成目途を得た。 ・エクセルギ分析により、損失が発生している部位を定量的に評価し、優先的に性能向上すべき部位を評価・特定した。	達成
⑦高機能構造技術	･各種構造コンセプトの比較検討 ･1600℃級ガスタービンにおける詳細クリアランスデータの取得に向けた準備	・構造コンセプトを考案し、その比較検討を実施した。 ･1600℃級ガスタービンにおける詳細クリアランス	達成

		データの取得に向けた準備を実施した。（11 月に計測予定）	
⑧高性能シール	リーフシールの適用に向けた基礎試験装置の製作とデータ取得	リーフシールの適用に向け、基礎試験装置を製作した。試験を実施し、基礎データ取得した。	達成
⑨先進製造技術	・長穴加工 L/D>250 ・溶接変形の 20%以上低減 ・高強度の中子・鋳型の候補材抽出	・長穴加工を実施し、L/D＞250 を達成した。 ・レーザー溶接工法の静翼冷却通路への適用により、変形を 20%低減する目途を得た。 ・複数候補材の組成について、鋳型原料調整・スラリー調整条件等決定し、特性評価用鋳型試験体の候補材を抽出した。	達成
⑩超高温強度評価技術	・高温域での設計に向けた材料データの取得 ・超高温域長時間使用後の健全性確認のための材料データ取得に着手	・高温域での材料データを取得した。 ・超高温域での長時間使用後の条件を模擬するため、加熱時効処理試験に着手した。H25 年度末には、5000hr 後のデータを取得完了予定。	達成
⑪特殊計測技術	・高温での動翼振動計測技術（非接触）の開発と実機計測 ・高温での動翼チップクリアランス計測技術の開発と、実機計測準備の実施	・実機ガスタービンで、燃焼器着火後の高温条件での、タービン動翼振動計測技術を開発し、データを取得した。 ・高温での動翼チップクリアランス計測のためのセンサーを開発し、実機計測の準備を行った。（11 月に計測予定）	達成
⑫高精度・	・直径φ0.7mm のき裂検知極	・直径φ0.7mm の極小ファ	達成

高機能検査技術	小センサの試作と計測手法の開発 ・試計測の実施により、検知精度 0.5mm 以下を達成する。	ーバースコープを用いたき裂検知極小センサーを試作した。 ・直径 0.5mm のき裂検知の目途を得た。	
⑬高性能・ダンパ振動制御技術	・ダンパの基礎試験を実施し、振動数やダンピングの基礎データを取得する。	・ダンパ試験装置を製作し、振動数やダンピングの基礎データを取得した。これらのデータを基に改良ダンパの検討に着手した。	達成

４．事業化、波及効果について

４－１　事業化の見通し

（平成 23 年度までの研究開発の成果と実用化状況）

1700℃級ガスタービン実用化に当たっては、1500℃級ガスタービンの開発で得られた知見の延長線上での開発が困難であり、全く未知の領域での開発が必要となることから、以下の実用化までのロードマップに示すように、段階を踏んで開発を進めることによりリスク低減を図り確実に技術開発を進めてきた。

これまでの検討を通じて、1700℃級ガスタービンの実現の為に必要となる燃焼、材料等の革新的な要素技術の完成度を、各要素試験や解析検討、より実機に近いモジュール試験（H23 年度に実施）を通じて、実用可能なレベル、すなわち、実機ガスタービンの設計に着手可能なレベルに引き上げた。

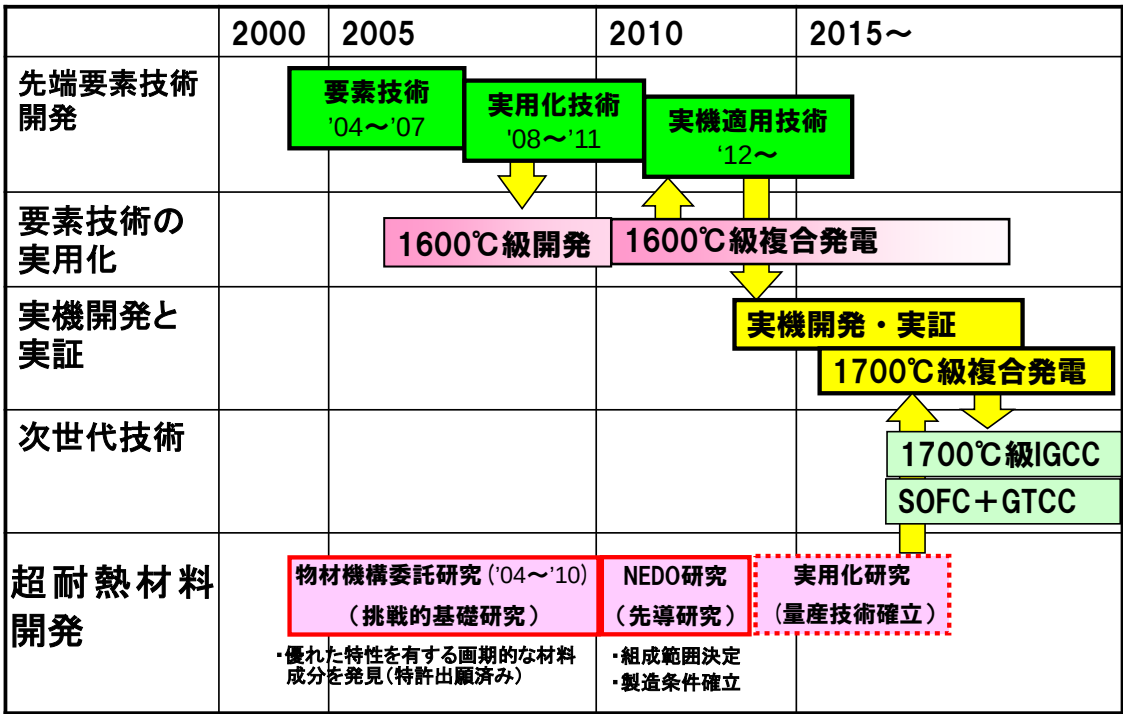
一方で、およそ 700℃～900℃の高温・1 万 G を超える高遠心力の厳しい条件下で 1 年以上の連続運用が求められる発電用ガスタービンは、あらゆる機械製品の中でも最も技術の裾野が広く、かつ先進性の高い機械のうちのひとつであり高い完成度が求められる。

したがって、1500℃級から 1700℃級に、一足飛びに 200℃高温化することは大きなリスクを伴うことも事実である。そこで、ガスタービンの高温化における我が国のリードを保ち、かつ、1700℃級ガスタービンの実現の足掛かりとするために、本プロジェクトと並行して、1600℃級ガスタービンの開発を実施した。すなわち、我が国の 1500℃級の経験を基礎としつつ、本プロジェクトの要素試験・解析・モジュール試験を経てその有効性や信頼性が確認できた革新的要素技術を活用して、世界で初めてとなる 1600℃級 J 形ガスタービンを開発した。

本プロジェクトの成果を活用･実用化した 1600℃級 J 形ガスタービンを用いて、現状の 1500℃級から 100℃高温化した未知の世界での運用実績を蓄積すると共に、実運用を通じてしか知ることの出来ない技術課題の抽出を行った。（Step-2 である実用化技術開発と並行して、三菱重工業㈱にて、平成 23 年 2 月に試運転を実施した。）

引き続き、平成 24 年度から、実証事業として、実証機の開発の準備を進めている。平成 28 年度より 1600℃級での運用実績を蓄積しつつ 1700℃級の実証機の設計・開発を行い、平成 32 年度に 1700℃級での実証試験を行なう。
表９に、1700℃級ガスタービン実用化のロードマップを示す。

表９　1700℃級ガスタービン実用化のロードマップ



４－１－１．要素技術開発成果の既存機種への適用、実用化について

高性能冷却システムや、低熱伝導率遮熱コーティングなどについては、既存機へ適用する場合の改良範囲が比較的少ないため、三菱重工業（株）高砂製作所内実証発電設備の 1600℃級ガスタービンにて、平成 25 年度より一部試験適用し、実績を評価した上で量産機に展開予定である。

他の要素についても、複数の既存機種への適用を予定しており、1700℃級の実用化に先立ち、以下の大きな効果を期待している。

● 国プロ技術導入効果により、効率向上が加速
□ 1400℃～1600℃級ガスタービンへ新技術を展開することにより、H20 年度か

らの 10 年間で平均約 2%発電効率を向上する。

● CO2 削減効果（国内）

□ ガスタービン効率向上分約 450 万トン（10 年間）

□ 微粉炭焚火力からガスタービンコンバインドへ置換約 1500 万トン
（10 年間で 5 プラントと仮定した場合）

● 経済効果

□ 上記効率向上により、技術開発競争が熾烈な市場において、大型ガスタービン 20 台/年から 30～50 台/年に競争力が向上するため、3000 億円～5000 億円の経済効果が期待できる。

４－１－２． 1700℃級ガスタービンの事業化の見通しについて

（市場規模）

先進国および途上国のいずれも、電力需要が伸びており、引き続き、ガスタービンの市場規模は 40GW レベルで拡大傾向である。

また、非在来ガスが利用できるようになり、算出国では燃料価格が低下、一方、ガスを輸入に頼るアジア諸国では、燃料価格の高騰と高止まりと、環境問題の深刻化により、クリーンで経済的な高効率ガスタービンの需要が伸びている。

日本、米国、アジアを中心に、1400℃級→1500℃級→1600℃級へ主力機が移行しつつある。引き続き、超高性能機へ移行していくことは確実であり、大型ガスタービンの台数で年間 200 台程度の市場規模は十分期待できる。したがって、現在高温化で世界をリードしているわが国が、先行開発をしていくことは需要側からの期待も大きい。

（環境適合性）

ここ数年、地球温暖化に対するニーズが高まっており、CO2 排出原単位で比較すると、1500℃級複合発電は 0.34 kg-CO2/kWh に対して、1700℃級複合発電では、0.31 ～ 0.32kg-CO2/kWh であり、既存複合発電の CO2 排出原単位を下回る初の火力発電システムとなる。

さらに、1700℃級で検討している EGR（排ガス再循環システム）を用いることにより、排ガス中の CO2 濃度を高くすることができるため、CO2 回収を他のどの火力発電システムより、安価に実現することが可能となる。

（信頼性確保）

従来機と比較して、1700℃級複合発電設備の実用化に対しての懸念事項として、

信頼性確保が挙げられる。
　信頼性確保については、
　●主要コンポーネントの先端要素技術の高度化
に加え、以下の三種類の要素技術開発を並行して進める。
　●主要コンポーネント以外で、設計に必要な先端要素技術
　●製造に先立ち準備しておくべき、先端製造技術や検査技術
　●試運転時にガスタービン内部の温度や振動を計測するための特殊計測技術
これらを、実施中の 4 年間で事前検討することにより、実設計に入る前のリスク低減を図る（図４参照）。
さらに、上述のように
　●1600℃級 J 形ガスタービンに新技術を先行適用
することにより、総合的な信頼性向上が可能となる。

（経済性）
・超高効率機は、主にベースロード運用されるために、特に有利となる。
・シェア拡大の具体的なマーケットとして、特に、燃料価格の高い地域で、超高効率機の需要が高い。
・これに相当する地域として、東アジア（日本含む）、東南アジアが有望である。特にアジアでの電力需要の伸びが予測されており、超高効率ガスタービンの市場としても大きい。
一例として、既に、国プロ技術を適用した 1600℃級 J 形ガスタービンは、
　　日本　6 台
　　韓国　10 台
　　台湾　6 台
の受注を得ている。（平成 25 年 10 月時点）

・日本メーカーは、特に、このアジア市場で最も高いシェアを有しており、実績と顧客からの信用面で有利である。

・一方、シェールガスの影響で、天然ガス価格が低下した北米でも、大電力事業者を中心に、ベースロード運用を前提とした超高効率機の需要が高まってきている。

・発電事業者の視点で、経済性を具体的な数字で評価すると以下となる。
尚、コンバインドサイクルの発電所の建設費は、Gasturbine　World 誌に記載さ

れている代表的な数字を用いて評価する。

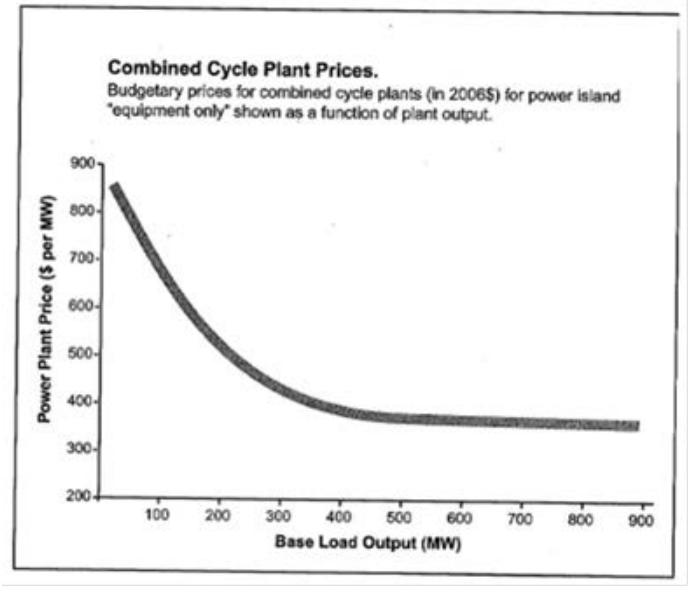


図３５　発電設備コストの比較(コンバインドサイクル)

（出典）Gas turbine World 2008 より

・超高効率ガスタービンを用いた発電設備は、従来の複合発電設備を含む、あらゆる火力発電設備よりも効率面で優れているため、系統運用上も運用優先順位は高いものと考えられ、ベースロード運用されることが多い。この場合の利用率は、一般に年間約９０%に達する。

本プロジェクトのガスタービンは
超高効率機なのでベースロード運用を基本とする。

超高効率機を
優先的に運転

	運転パターン							年利用率
	月	火	水	木	金	土	日	
ベースロード運用								90%
WSS (Weekly Start Stop) 運用								70%
DSS (Daily Start Stop) 運用								50%

運転パターンの条件
計画停止期間:30日とします。
ベースロード運転: 100%負荷運用。
WSS運用: 平日100%負荷運用。週末32時間停止。
DSS運用: 平日16時間は100%負荷運用、平日夜間8時間停止。週末32時間停止。

図３６　　運転パターンの違いによる利用率比較

・図３５より、仮に 500MW の発電設備を想定すると、固定費は約 200 億円。
図３６より、年間 8000hr のベースロード運用を想定すると、
・年間総発電量は 4×10^6MWh。
・効率 57%HHV での燃料発熱量は、年間　7×10^6MWh=24×10^6MMBtu
・天然ガスの価格を、仮に 10$/MMBtu＝1000￥/MMBtu　（1$=100¥）とする。
（注）平成 25 年の夏季のガス価格は、
ガス価格が高い日本・韓国などでは、17$/MMBtu 程度
ガス価格が低い米国（シェールガス）では、3$/MMBtu 程度
とされており、その平均値は、10$/MMBtu＝1000￥/MMBtu　となる。
この場合、年間の燃料代は、約 240 億円/年と計算される。
すなわち、固定費に比べ、燃料代が相対的に高く、超高効率発電では、燃料代節約の効果が圧倒的に大きいことがわかる（表１０参照）。我が国のように、ガス価格が高い場合は、500MW の発電設備を年間 8000hr 運用すると、発電効率を 52%→57%に高めることにより、年間 39 億円程度の燃料代の節約となる。

表１０　発電効率を５２%⇒５７%とした場合の年間の燃料代の差

燃料価格	発電効率　５２%	発電効率　５７%	燃料代の差
１７$／ＭＭＢｔｕ	４４７億円	４０８億円	Δ３９億円
１０$／ＭＭＢｔｕ	２６３億円	２４０億円	Δ２３億円

４－２　波及効果

本技術開発により、世界最高効率の 1700℃級ガスタービン技術確立に向けて順調に技術開発が進んでいる。

本技術により、既成ガスタービンより化石燃料単位の発電電力量を高めることが可能となり、限られた化石燃料の有効利用、発生 CO2 量の削減に貢献することが出来る。

上述のように、開発した革新的な技術のうち、実記適用可能と判断されたものは、世界初の 1600℃級 J 形ガスタービンの開発に適用された。これにより、我国のコンバインド発電技術の優位性を保つことが出来る。また、1500℃級をはじめとする既存のガスタービンへの技術的適用も進められており、大型の発電用ガスタービン全体の競争力強化の点で波及効果は大きい。

さらに、高効率高温ガスタービンは、石炭ガス化発電 IGCC の主機の一つとして、そのまま適用可能である。1700℃級の IGCC が実現すれば、燃料の多様化によるエネルギーセキュリティ上のメリットに加え、発生 CO2 量の大幅な削減が期待できる。

・高効率ガスタービンの開発により、国家的に補助されて伸長している欧米のメーカに対して、高い競争力を有する高性能ガスタービンの製造が可能になり、国内・海外の新規プラントに対して国産機の受注増大、外貨獲得が見込めるので、国内関連産業への波及効果も含めて国益になる。（米国エネルギー省(DOE)の国家プロジェクトでは米国ガスタービンメーカ、大学に 1992 年から 10 年間で約 800 億円を投資。また、ＥＵでも、要素技術開発を実施中。）

・現在急拡大する中国市場への進出の代償として、中国メーカへの技術移転を要求される。将来中国との競争で生き残るためには、ガスタービンに適用される高度総合機械技術のエッセンスである要素技術を次のステップに進化させる国家プロジェクトが、日本産業界にとっても重要な意味を持つ。

・本プロジェクトで開発される超高温ガスタービン技術は、本技術は、LNG 複合発電以外に、

・IGCC 用ガスタービンの高効率化

・将来の水素(*)燃焼ガスタービン

(*)IGCC からの水素製造、原子力夜間電力による水素製造

に展開可能である。いずれに対しても総合効率を決めるキーテクノロジーであり、今後の燃料多様化、エネルギーのベストミックスに対して有効な技術となるため、日本産業界の競争力強化のために非常に価値がある。

図２や表１０に示すように、発電用ガスタービンは、経済性が高く、かつ、効率改善の経済効果（燃料代低減効果）が大きい。一方で、効率改善には、高度な技術が必要なため、技術開発の達成度が市場シェアに直結する場合が多い。

日本は、徐々にシェアを伸ばしてきたが、2009 年以降は、リーマンショック後の急激な円高のため世界市場で苦戦を強いられた。しかし、国プロ技術を反映した J 形ガスタービンの市場投入（国内電力向け）により 2010 年-2012 年はシェアが躍進した。

５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

５－１　研究開発計画

本事業の研究開発計画について、以下のとおり示す（図３７ 、表１１参照）。本事業は、4 年間の要素技術開発（技術開発事前技術検証）とそれを基にした 5 年間の実証試験　の計 9 年間の計画となっている。事業開始 4 年目の実証機建設前に中間評価を行い、補助率も含め事業の見直しを行う予定である。

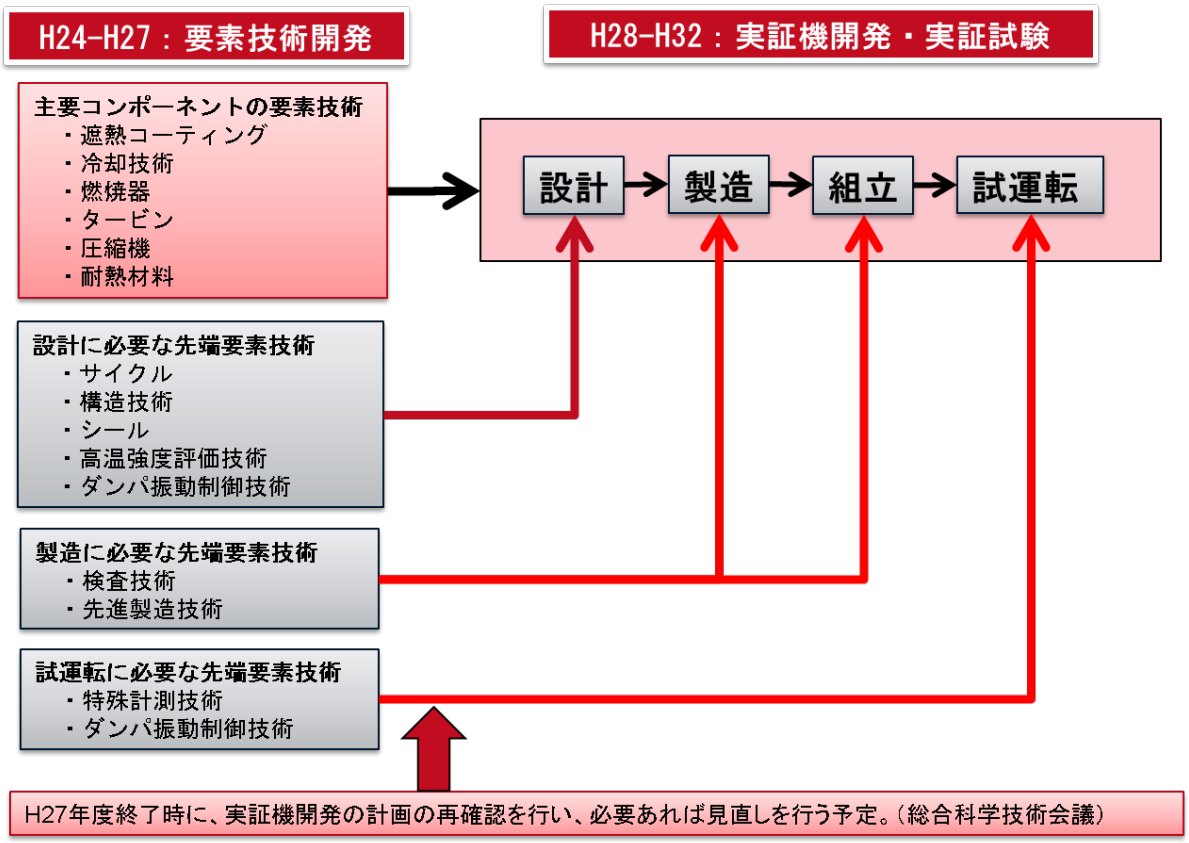


図３７　　4 年間の要素技術開発と 5 年間の実証試験

（参考）総合科学技術会議「高効率ガスタービン技術実証事業費補助金」の評価結果：平成 23 年 11 月　より抜粋

「事業の開発フェーズに応じた的確な計画の見直しについて」

本事業は、4 年間の要素技術開発（技術開発事前技術検証）とそれを基にした 5 年間の実証試験（約 1 年間の実証機設計、約 2 年間の実証機建設、約 2 年間の実証試験検証）の計 9 年間の計画となっている。

経済産業省においては、産業構造審議会評価小委員会で、3 年ごとの中間評価と事業終了時の事後評価を実施し、また、これとは別に、事業原課が主体となって事業評価検討会を設置して事業開始 4 年目の実証機建設前に中間評価を行い、補助率も含め事業の見直しを行うとしている。

表１１．研究開発計画（H24 年度～H27 年度の要素技術開発）

	H24 年度	H25 年度	H26 年度	H27 年度
①低熱伝導率遮熱コーティング	材料改良基礎検討 皮膜構造改良 ｺﾝｾﾌﾟﾄ検討	材料計算・粉末試作 熱応力解析・密着力評価	TBC 試作･基本特性評価 短時間劣化評価	皮膜構造適正化 長時間劣化評価 燃焼試験翼施工
②高性能冷却システム	基本ｺﾝｾﾌﾟﾄ検討 ｺﾝｾﾌﾟﾄ検証解析・試験	ｼｽﾃﾑ概念設計・解析 要素検証試験	ｼｽﾃﾑ詳細設計・解析 冷却ｼｽﾃﾑ検証試験	改良設計装置製作 燃焼翼列試験
③非定常性制御燃焼技術	基本コンセプト検討 要素解析・気流試験	要素燃焼試験 要素解析・気流試験	装置設計・製作 燃焼試験 解析・気流試験	改良・製作 燃焼試験 解析・気流試験
④超高性能タービン	基本ｺﾝｾﾌﾟﾄ検討 要素解析翼列試験	要素解析・翼列試験 改良ｺﾝｾﾌﾟﾄ検討	要素解析翼列試験 モデルタービン試験 設計製作	改良設計製作 モデルタービン試験
⑤境界層制御高性能圧縮機	境界層制御ｺﾝｾﾌﾟﾄ検討 要素解析・モデル翼試験	境界層制御改良検討 モデル圧縮機試験	多段圧縮機設計製作 多段圧縮機試験	改良設計製作 多段圧縮機試験
⑥超高性能サイクル	基本コンセプト検討	基本サイクル解析	改良サイクル解析	最終サイクル解析
⑦高機能構造技術	基本ｺﾝｾﾌﾟﾄ検討 要素解析・ｸﾘｱﾗﾝｽ計測試験	要素解析・ｸﾘｱﾗﾝｽ計測試験 ｸﾘﾗﾝｽ制御装置設計	設計・製作 ｸﾘｱﾗﾝｽ制御試験	改良設計・製作 ｸﾘｱﾗﾝｽ制御試験
⑧高性能シール・高性能軸受	基本ｺﾝｾﾌﾟﾄ検討 要素解析検証試験	要素解析・検証試験 改良コンセプト検討	要素解析検証試験 改良設計	試験装置製作 実機模擬特性試験
⑨先進製造技術	施工法検討 ｺｰﾃｨﾝｸﾞ・溶接基礎試験	ｺｰﾃｨﾝｸﾞｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ成膜状態基礎評価 溶接ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ、施工状態基礎評価	条件最適化、膜性能評価 実部品成膜ﾌﾟﾛｸﾞﾗﾑ開発 条件最適化、溶接性能評価 実部品施工ﾌﾟﾛｸﾞﾗﾑ開発	実部品成膜検証・評価 実部品施工検証･評価
⑩超高温強度評価技術	基本ｺﾝｾﾌﾟﾄ検討 要素解析・材料試験	要素解析・疲労試験 損傷評価基礎試験	要素解析・疲労試験 損傷評価検証試験	構造ﾓﾃﾞﾙ試験・解析
⑪特殊計測技術	調査研究 基本ｺﾝｾﾌﾟﾄ検討 要素試験	特殊計測ｼｽﾃﾑ設計製作 検証試験	改良検討 実機適用	改良製作 高圧燃焼翼列試験適用
⑫高精度・高機能検査技術	基本ｺﾝｾﾌﾟﾄ検討 要素技術基礎試験	解析評価ｾﾝｻ試作 ｾﾝｻ性能評価試験	ｾﾝｻ設計・製作 ﾓｯｸｱｯﾌﾟ検証試験	ｾﾝｻ改良・製作 実機検証試験
⑬高性能ダンパ・振動制御技術	基本ｺﾝｾﾌﾟﾄ検討 要素解析・要素試験	要素解析・要素試験	改良ｺﾝｾﾌﾟﾄ検討 振動解析・振動試験	振動解析・振動試験

５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、三菱重工業(株)が経済産業省資源エネルギー庁より補助金を受けて実施した。また、再委託先として大阪大学、九州大学、北海道大学、大阪工業大学等が参加、または参加計画である（図３８ 参照)。

また、研究開発の実施に当たっては、研究開発を統括するためのプロジェクトリーダー（三菱重工業(株)）を任命した。

さらに、超耐熱材料の開発にあたっては、他の要素技術に比べてより基礎的な研究からスタートする必要があること、技術開発に時間がかかることなどの理由により、省庁間連携として文部科学省と（独）物質・材料研究機構が、委託先である三菱重工業(株)と研究を実施した。

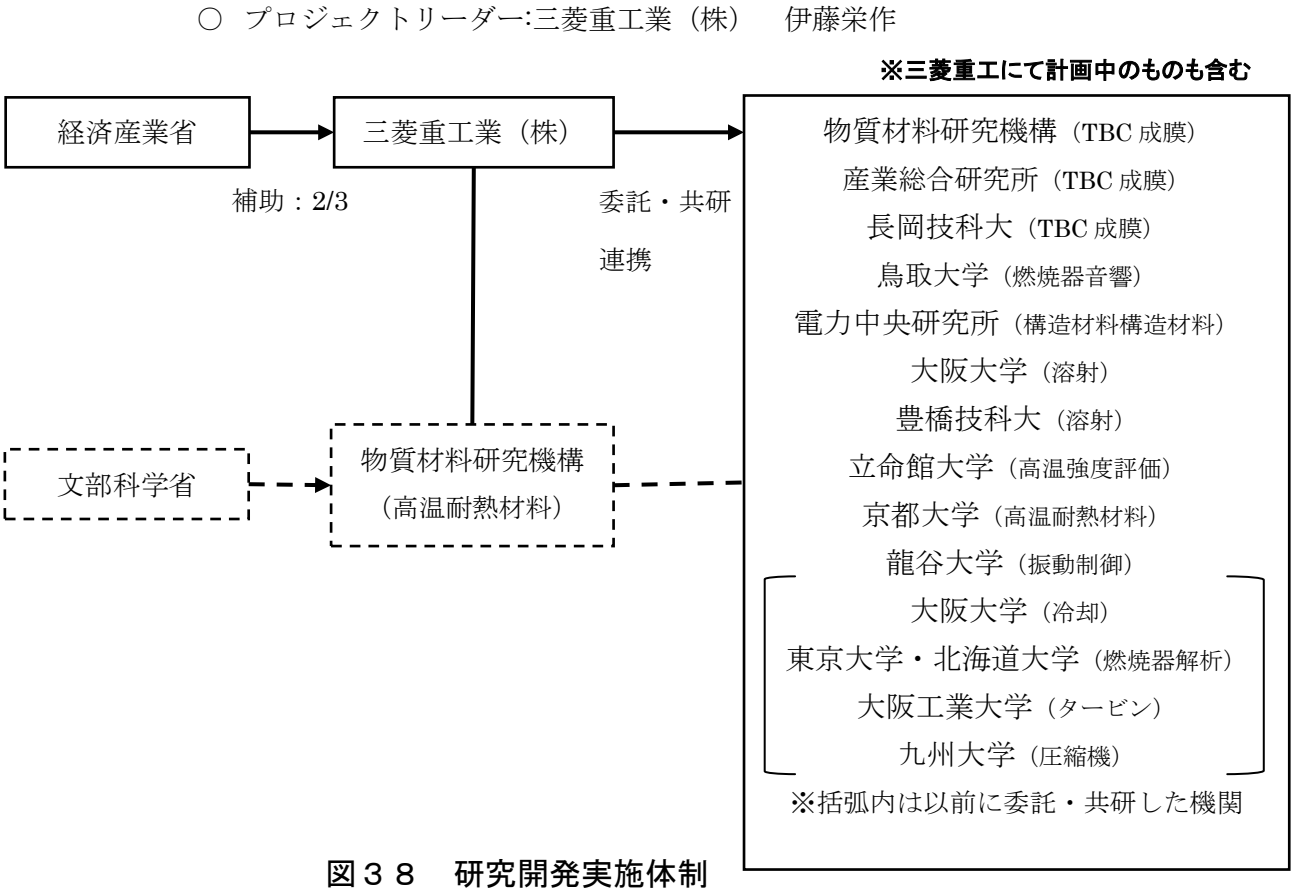


図３８　研究開発実施体制

５－３　資金配分

本事業の 9 年間の各技術開発の資金配分を以下に示す（表１２参照）。

表１２．資金配分　　（単位：百万円）

年度：平成	２４～３２	計
要素技術開発	6,316	14,046
設計	1,970	
製作	4,500	
試運転	1,260	

５－４　費用対効果

本事業には 2 年間で約 24 億円の補助金が投じられ、ガスタービンを用いたコンバインドサイクルとしては世界最高の発電効率である 57%（HHV）の達成に向けた技術開発に目処をつけるなどの成果をあげた。

さらに、老朽化した石炭、石油、LNG 火力発電設備の高効率コンバインドサイクル発電設備へのリプレース需要が高まっており、この場合は、効率の向上量が大きくなるため、さらに大きな燃料削減効果が期待できる。

【CO2 削減量】

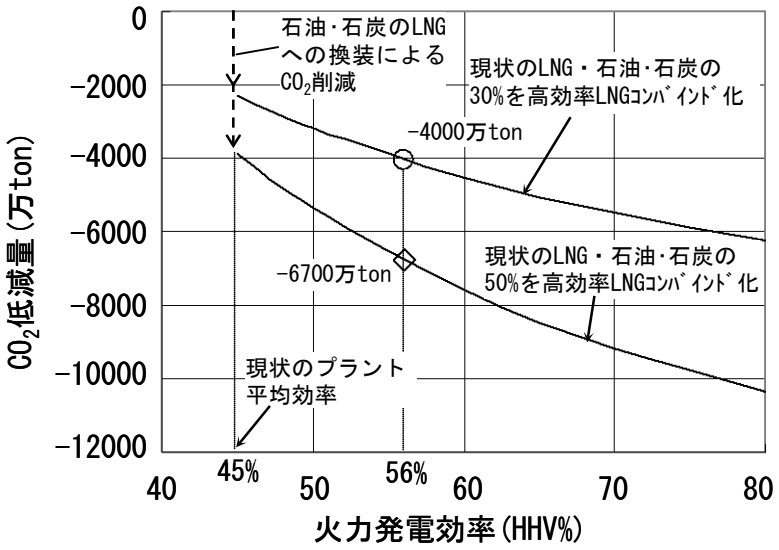
1700℃級の高効率ガスタービンを開発した場合、既設の石炭、石油、LNG 火力発電の 30%～50%の発電出力を 1700℃級複合発電に置き換えると、発電所から発生する CO2 発生量の 10～17%(＊)が削減可能である（表１３、図３９ 参照）。

（＊）我が国の電気事業全体からの CO2 排出量約 4 億トンとの比較。なお、ベースは、（財）電力中央研究所出典の「わが国における電源構成の推移（後出）」に基づいている（図４０ 参照）。

また、排ガス再循環システムでは CO2 回収が、他のシステムより低コストで実現可能となる可能性がある。この場合は、CO2 排出原単位は 0.03kg-CO2/kWh 程度とできる。

表１３　1700℃級複合発電による CO2 削減効果／省エネルギー効果

置きかえる 既存発電所の割合	CO_2削減量	全発電所からの排出量に占める割合	省ｴﾈﾙｷﾞｰ効果 （原油換算）
30%	4000万ton/年	10%	1300万トン
50%	**6700万ton/年**	**17%**	**2200万トン**



1700℃級ガスタービンCO_2低減効果

図３９　1700℃級ガスタービン導入による CO2 低減効果

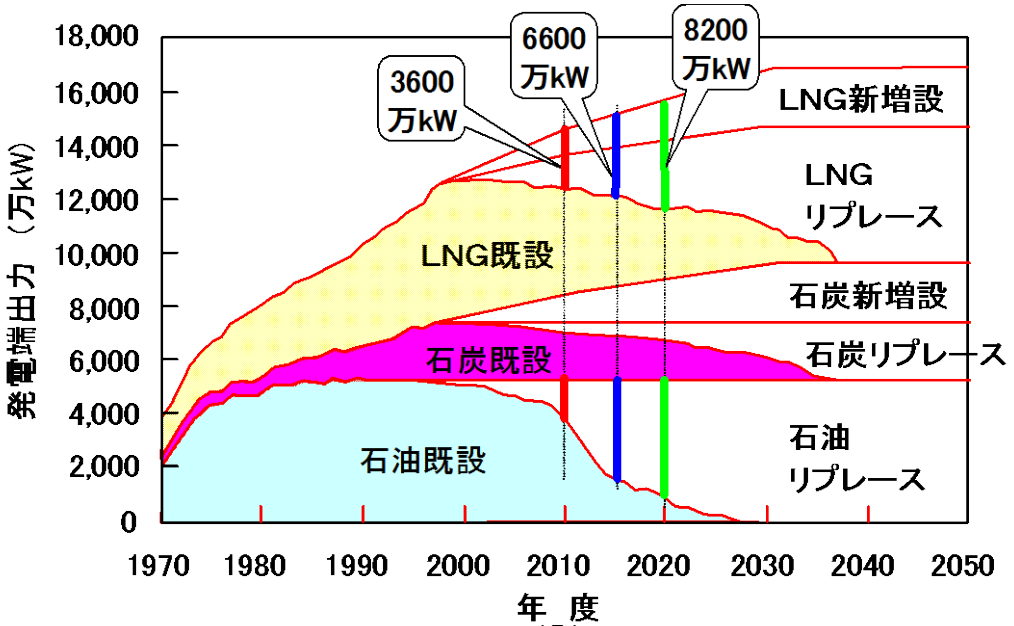


図４０　わが国における電源構成の推移（プラント寿命 40 年）

出典：電力中央研究所「第 18 回ｴﾈﾙｷﾞｰ未来技術ﾌｫｰﾗﾑ」(1999.11.2)

【省エネ効果】

既設の火力発電所の 30%～50%を 1700℃級ガスタービン高効率コンバインドプラントに置き換えると、原油換算で 1300 万～2200 万トン/年の省エネ効果がある。

我が国のように、ガス価格が高い場合（17$/MMBtu 程度）は、500MW の発電設備を年間 8000hr 運用する場合を想定すると、発電効率を 52%→57%に高めることにより、年間 39 億円程度の燃料代の節約となる。（表１０）

５－５　変化への対応

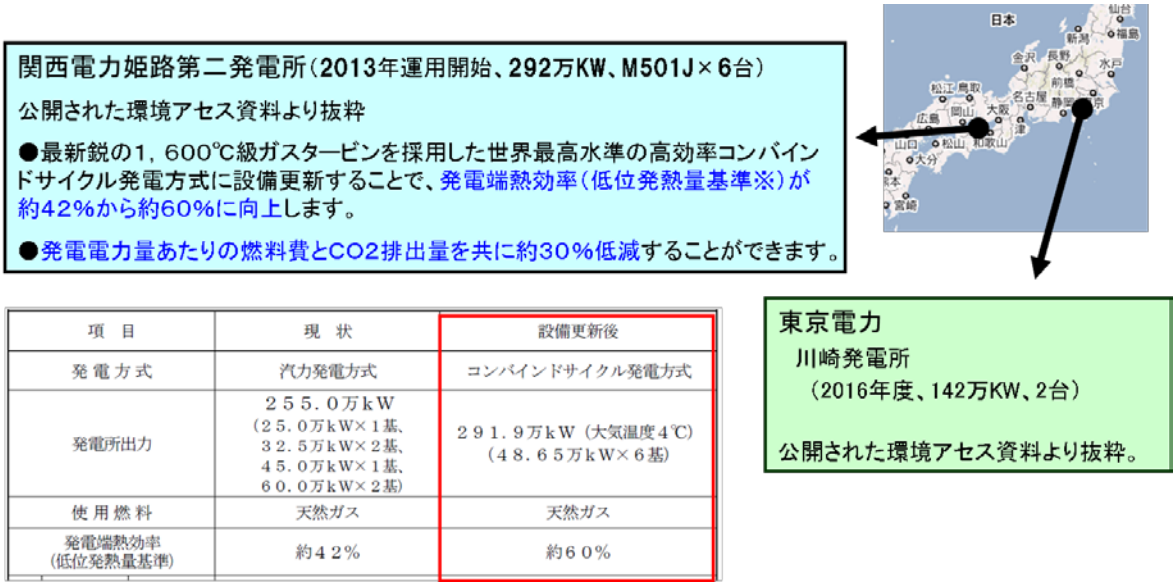
５－５－１　　環境問題への対応

環境問題の高まりにより、温室効果ガスの排出量低減に対する要求が高まっている。このため、風力発電や太陽光発電などの自然エネルギーの普及に拍車がかかっている。天候に左右される自然エネルギーの普及とともに、負荷吸収能力の高い大容量の電源が必要となるが、この点でガスタービンは最適である。また、化石燃料を使用する火力発電についても、より CO2 排出原単位の小さいクリーンな燃料として LNG が選択されることが多くなっている。本プロジェクトで開発中の技術により可能となる、超高温高効率ガスタービンを用いたコンバインド発電は、このような市場のニーズ・トレンドに沿っており、有効な技術開発である。

５－５－２　　国内リプレース需要への対応

一方、このような環境負荷の小さい発電設備に対する要求と並行して、先進国では導入後 30 年以上を経た老朽火力のリプレース需要が急速に高まりつつある。このような発電設備では、経済性が重要視されるため、発電効率の高い最新鋭のガスタービンを用いたコンバインド発電が選択される場合が多い。このようなニーズにいち早く応えるために、本事業で開発した革新的な要素技術のうち、実機適用可能と判断された技術を活用して、世界初の 1600℃級 J 形ガスタービンの開発を行い、高効率を前提とした発電設備のニーズに応えた（図

４１ 参照)。



項 目	現 状	設備更新後
発電方式	汽力発電方式	コンバインドサイクル発電方式
発電所出力	２５５．０万ｋＷ (２５．０万ｋＷ×１基、 ３２．５万ｋＷ×２基、 ４５．０万ｋＷ×１基、 ６０．０万ｋＷ×２基)	２９１．９万ｋＷ（大気温度４℃） (４８．６５万ｋＷ×６基)
使用燃料	天然ガス	天然ガス
発電端熱効率 (低位発熱量基準)	約４２％	約６０％

図４１　1600℃級ガスタービンの高効率を前提とした国内発電設備の計画
（出典：公開された環境アセス資料より）
1600℃級ガスタービンの高効率を前提とした発電設備

５－５－３　急速な円高とその後の景気減退時のシェア確保

我が国は、大型電力事業用ガスタービンの導入に関して徐々にシェアを伸ばしてきたが、2009 （平成 21 年）年以降は、リーマンショックに伴う急速な円高のため世界市場で苦戦を強いられている。しかし、国プロで開発した技術を反映した1,600℃級Ｊ 形ガスタービンの市場投入(国内電力向け)により2010 年（平成 22 年）～2012 年（平成 24 年）はシェアが躍進した。

５－５－４　東日本大震災後の原発稼働停止に伴う電力不足への対応

東日本大震災後は、原子力発電所の稼働停止に伴う電力不足が大きな懸念事項となった。

1700℃級ガスタービンの要素技術を適用して開発された 1600℃級 J 形ガスタービンの試運転は、平成 23 年 2 月に実施された。1600℃条件到達後、種々の試験が実施され、重要な検証項目として実施中であった 100 時間連続運転の終了間際に 3 月 11 日の大地震が発生した。

試運転後、電力会社からの要求により、1600℃級 J 形ガスタービンは、多くの特殊計測用のセンサーをつけたまま発電を継続し、夏季重負荷期の発電ニーズに無事応えることができた。これは開発直後のガスタービンとしては極めて

異例なことである。
　結果として、わずか一年半後の平成 24 年 12 月には、ガスタービンとして十分な実績として判断される 8000 時間の総運転時間に到達した。
　図らずも、運転時間蓄積により、高温部品や遮熱コーティングの長期信頼性検証データや、性能面での経年劣化データ、季節変化による作動条件や性能の大気温度特性データを多く取得することができ、本研究にも活用している。

５－５－５　短期間での発電開始ニーズへの対応
　新規の複合発電設備は、通常 2 年程度の建設期間が必要であるが、ガスタービン単体で発電を開始することもできる。大型ガスタービンでも全長は約１５ｍ程度であり、工場で組立てた後、輸送し現地に設置することができる。
従って、工期がわずか数か月で発電を始めることが可能となる。
　このため、ガスタービン単体で排気ガスをそのまま排出する場合の騒音低減や、ＮＯｘ低減なども開発時に考慮することとした。
　さらには、蒸気発生源としての排熱回収ボイラがない場合の運用が必要であるため、燃焼器の冷却媒体として蒸気ではなく空気を使用する「空冷燃焼器」も視野に入れた開発を行うこととした。

（注）東日本大震災後の電源不足に対応するため、約 6 か月で大型ガスタービンによる発電を現地に設置し発電を開始した例がある。図らずも、大型ガスタービンが緊急時に適した電源であることが実証されている。

５－５－６　自然エネルギーの普及に伴う運用性ニーズへの対応
　検討中のガスタービンは、大容量であるため、わずか 1 分間で発電量を約 50MW 増減させることができる。この「高い負荷変動吸収能力」により、風力発電や太陽光発電の発電量の変動を広域でカバーし、再生可能エネルギーの普及を促進することができる。
　このように運用性として、急速起動や負荷変化能力も考慮して構造検討を実施する。

B2. 高湿分空気利用ガスタービン技術実証事業

１．事業の目的・政策的位置付け

１－１　事業目的

平成２３年３月の東日本大震災の後、原子力発電所の多くが停止されており、我が国の発電電力量の約９割が火力発電によるものとなっている。その発電効率は 40.9%（平成 17 年度一般電気事業者の平均発電端熱効率）と既に世界最高レベルに達している。しかし、資源の乏しい我が国のエネルギーセキュリティーの確保に関する問題及び近年の地球環境問題双方への対応から火力発電所は、環境に配慮した更なる発電効率向上への取組が求められている。

エネルギー資源の中で天然ガスは、東南アジアを中心に世界各国に幅広く分布しており、我が国のエネルギーセキュリティーを確保する上で極めて重要な燃料である。また、他の化石燃料に比べ、燃焼時における二酸化炭素排出量が少ないため、環境負荷の少ないクリーンなエネルギーと言える。そのため、火力発電所における天然ガスの利用拡大を図るため、既設火力発電所に比べて二酸化炭素排出量の削減が多く見込まれる高効率ガスタービンの技術開発を推進していくことが強く求められている。

本事業で研究開発する高湿分空気利用ガスタービンＡＨＡＴ*1（以下、「本技術」）はこのような必要性に応える高効率ガスタービン技術であり、中小容量機（10 万ｋW 程度）の高効率化（45%(HHV)既設複圧 CC*2→51%(HHV)以上）を目標としている。ＡＨＡＴは 1980 年に日本で考案されたＨＡＴ*3 システムが基礎になっており、電力事業用に改良を加えた日本オリジナルの技術である。

世界初となるＡＨＡＴの実用化に必要な長期信頼性等の実証等の技術開発を行い、実用化に繋げることが本事業の目的である。

*1 アドバンスト高湿分空気利用ガスタービン：Advanced Humid Air Gas Turbine
*2 コンバインドサイクル：Combined Cycle
*3 高湿分空気利用ガスタービン： Humid Air Gas Turbine

１－２　政策的位置付け

平成２０年３月に閣議決定された「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」（経済産業省）において、高効率ガスタービンは、二酸化炭素排出量を抑制できる高効率天然ガス発電であり、「重点的に取り組むべきエネルギー革新技術」の一つとして位置付けられている。また、同計画で示されたロードマップにおいて、AHAT(高湿分空気利用ガスタービン)は、2020 年代に実用化を目指す技術として位置付けられている。

「技術戦略マップ」（平成２２年６月１４日、経済産業省）において、ＡＨＡＴは中小容量機の新設およびリプレースによるエネルギー効率向上できること

から「総合エネルギー効率の向上」、天然ガスの有効利用の観点から「化石燃料の安定供給とクリーン・有効利用」に寄与する技術の一つとして位置付けられている。

さらに、エネルギー基本計画(平成 22 年 6 月 18 日、経済産業省)において、「その他の火力発電については、新増設・更新の際には、原則としてその時点における最先端の効率を有する設備の導入を目指す。」と謳われており、ＡＨＡＴはリプレースにおける中小容量機のエネルギー効率向上に努めることができる技術である。

平成２３年３月の東日本大震災の後、平成２３年８月に制定された「第４期科学技術基本計画」(文部科学省)においては、安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現のため、火力発電の高効率化に資する技術開発は重点的な取組として位置づけられている

平成２５年６月に閣議決定された内閣府の「日本再興戦略」によると、3 つのプランのうち「日本産業再興プラン」、「戦略市場創造プラン」のなかで、高効率火力発電の先進技術開発の加速が宣言されている（図１-３）。「日本産業再興プラン」の中では、我が国が世界で一番企業が活動しやすい国となることを目指し、高効率火力発電（石炭・LNG）について、環境に配慮しつつ導入を進めるとともに、技術開発を進めて発電効率の更なる向上を目指すと記載されている。「戦略市場創造プラン」の中では、クリーンで経済的なエネルギーが供給される社会を実現するため、当面の主要施策として先進技術開発を加速し、世界最高水準の効率を有する火力発電を我が国で率先して導入するとともに、世界へ積極的に展開することが記されている。

また、平成２５年７月に総合技術会議「環境エネルギー技術革新計画」で示された高効率天然ガス発電のロードマップでは、AHAT が 2020 年頃までに 10 万 kW 級で 51% （送電端・HHV）の発電効率を実現することを目標としていること、AHAT は、高効率圧縮機設計技術やタービン翼冷却技術の開発が必要であることが記載されている。

AHAT と他の発電システムの関連づけとしては、平成１６年６月にとりまとめられた、（財）エネ総工研の「電力分野産業技術戦略」に関わる動向調査報告書において（図１-４）、ＡＨＡＴはガスタービンサイクルを改良したシステムであり、比較的早期に実用化が期待できる高効率発電システムである。また、次世代高効率発電システムである石炭ガス化と組み合わせたＩＧＨＡＴへ展開できる技術であると位置づけられている。

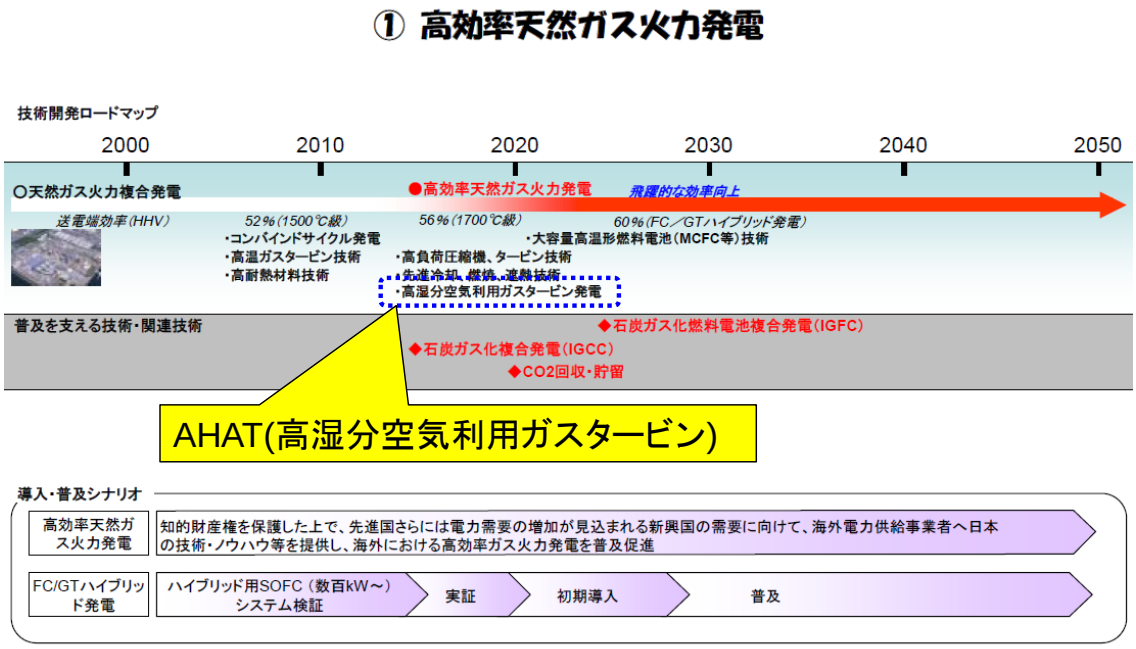


図１－１　「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」(平成２０年３月、経済産業省)におけるロードマップ

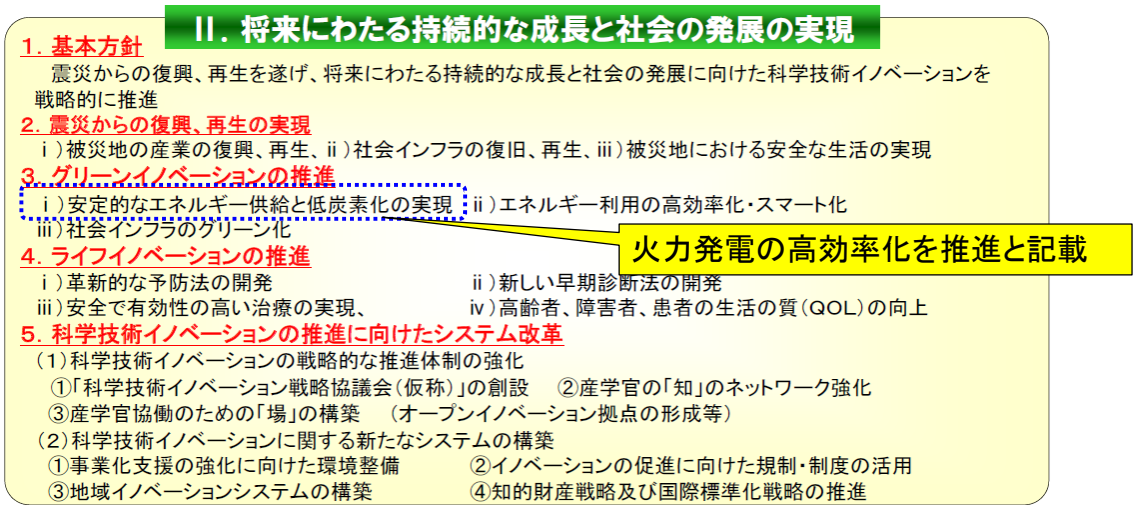


図１－２　「第４期科学技術基本計画」(平成２３年８月、文部科学省)における火力発電の高効率化の位置づけ

一．日本産業再興プラン
　　5．立地競争力の更なる強化（世界で一番企業が活動しやすい国を目指す）
　　⑦環境・エネルギー制約の克服
　　○高効率火力発電（石炭・LNG）の導入
　　・環境省と経済産業省が合意した環境アセスメントの明確化・迅速化を踏まえ、今後、
高効率火力発電（石炭・LNG）について、環境に配慮しつつ導入を進めるとともに、
技術開発を進めて発電効率の更なる向上を目指す。

二．戦略市場創造プラン
　　テーマ2：クリーン・経済的なエネルギー需給の実現
　　①クリーンで経済的なエネルギーが供給される社会
　　Ⅱ）解決の方向性と戦略分野（市場・産業）及び当面の主要施策
先進技術開発を加速し、世界最高水準の効率を有する火力発電を我が国で
率先して導入するとともに、世界へ積極的に展開する。

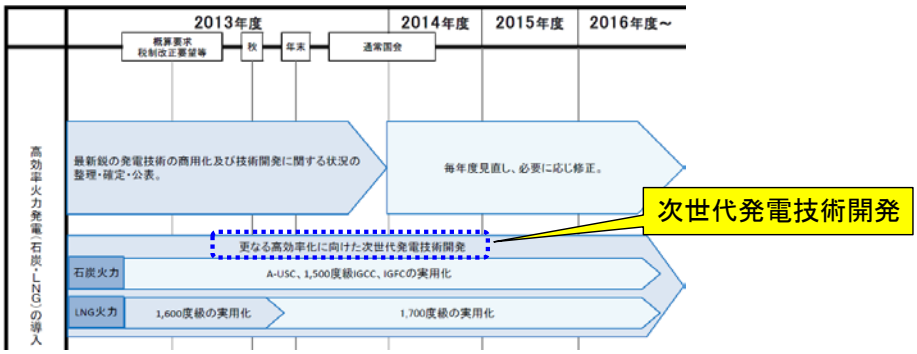
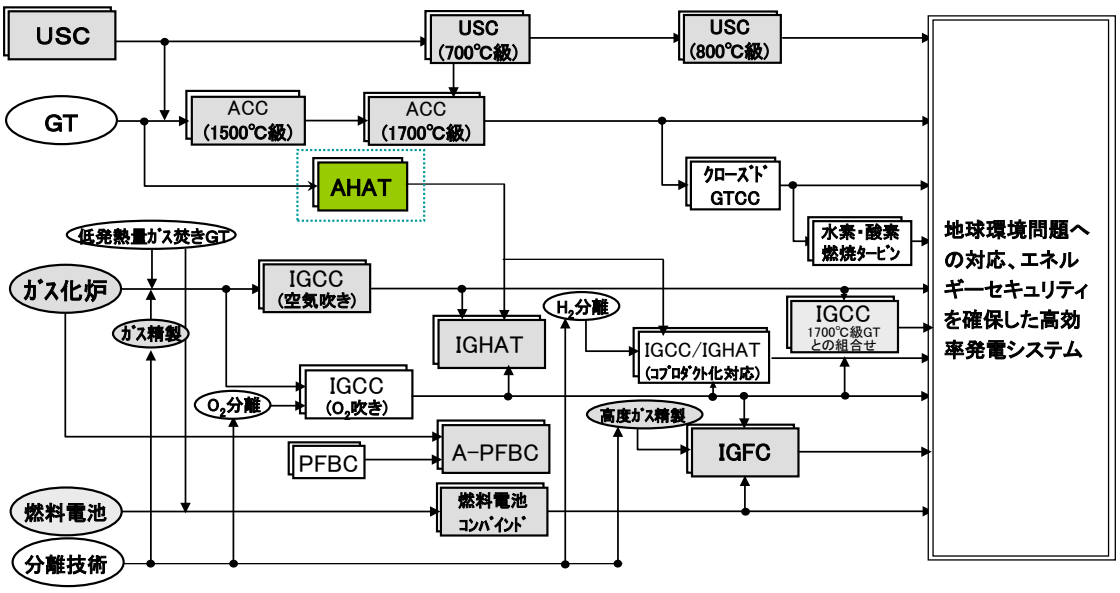


図１－３　「日本再興戦略」(平成２５年６月、内閣府)における高効率火力発電の位置づけ



出典：「電力分野産業技術戦略」に関わる動向調査報告書　平成16年6月　（財）エネ総工研

図１－４　各種発電システムにおけるＡＨＡＴの位置づけ

１－３　国の関与の必要性

ＡＨＡＴは、世界初、新型ガスタービン発電システムである。増湿装置、再生熱交換器など新たな機器を統合した全体システム特性や、高湿分圧縮機、高湿分燃焼器、高湿分冷却翼などで構成されるＡＨＡＴに適合したガスタービンは、未知なところが多く世界初の難度が高い技術である。民間企業だけでは開発リスクを伴うため、国の関与のもとで実用化技術開発を推進することで民間企業だけでは達成し得ない世界をリードする技術を確立することができる。

本技術を実用化することで、天然ガス利用促進によるエネルギーセキュリティー確保と高効率化によるＣＯ２削減を実現できるため社会的意義が高い。一方で、開発リスクの大きい技術であることから、国の主導・支援による事業とし、民間はそれぞれ優位技術をもつ複数社で構成している。また、最先端の高度な技術開発を行うため、複数の大学と共同研究を実施している。

本事業は、以下の技術的、事業的なリスクを同時に有しており、民間企業が安定して開発投資を継続するには２/３の補助率が必要である。

⑴ 技術的なリスク

複数の大学との共同研究が必要となるなど、最先端の高度な技術開発に伴うリスクがある。

⑵ 事業的なリスク

ＡＨＡＴは、新規な火力発電システムであるため、開発期間が長くかかるだけでなく、商用機の建設も環境アセスなどのリードタイムが長く、投資回収に時間がかかる技術である。今後、投資回収のない状態で、実証機の建設などの大きな投資を継続することは、事業者である民間企業には大きな事業上のリスクである。

２　研究開発目標

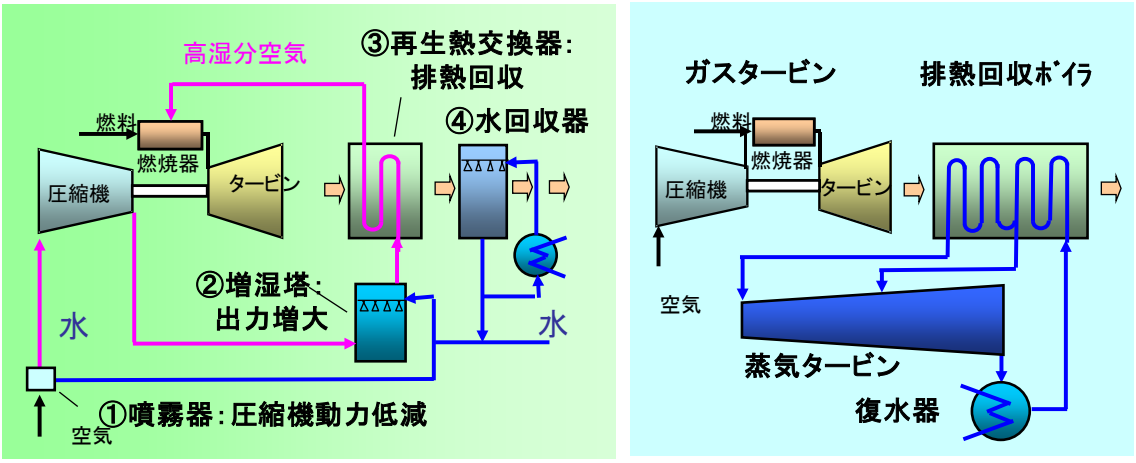
２－１　全体の目標設定

（１）ＡＨＡＴの概要

ＡＨＡＴは、ガスタービン本体の圧力比、燃焼温度の上昇により効率上昇を狙うのではなく、システムの熱回収の工夫により高効率を達成する新型ガスタービン発電システムであり、その概略系統を図２-１左に示す。ガスタービン圧縮機に吸気噴霧システムを採用している。吸気噴霧冷却による吸込み空気量の増加、圧縮機内部で液滴蒸発させることにより圧縮機動力低減の効果を狙っており、夏場の出力低下も抑制できる。圧縮機で加圧された空気は、増湿塔にて温水と直接接触することにより蒸気タービン蒸気量に匹敵する量を加湿する。再生熱交換器で熱回収した高湿分空気は燃焼器に供給される。加湿により出力増加し、再生サイクルにより排ガスの熱を回収し熱効率が向上する。高湿分空気はＮＯｘ低減に大きな効果が期待できる。また、排ガス中の湿分と凝縮潜熱

の一部を回収して再利用する水回収装置を有しており、水の消費量を抑制している。回収した水は、増湿塔に供給するとともにその一部を冷却して水回収器に再循環させている。

図２-１右に、コンバインドサイクルの概略系統を示す。コンバインドサイクルでは､ガスタービンと蒸気タービンの 2 台で動力を発生し高効率化している。ＡＨＡＴでは①噴霧器、②増湿塔、③再生熱交換器を設置し、ガスタービン 1 台で動力を発生し高効率化を図っている。



AHAT　　コンバインドサイクル

図２－１　ＡＨＡＴおよびコンバインドサイクルの概略系統

図２-２に各種発電システムの出力―効率特性を示す。AHAT は、コンバインドサイクルの蒸気ボイラの構成が複圧程度である～200MW 以下の中小容量クラスで他発電システムよりも高い効率を得ることができる。

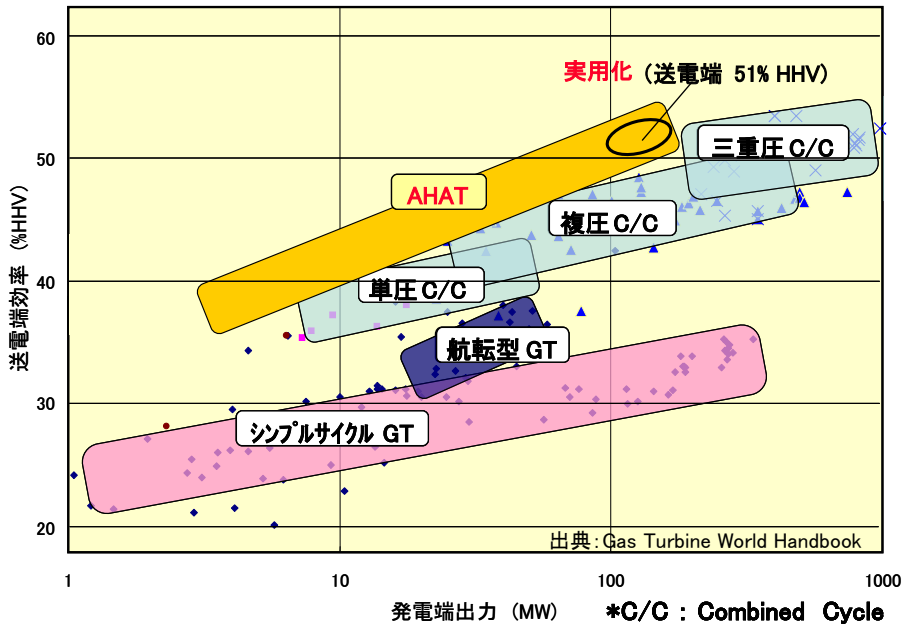


図２－２　各種発電システムの出力―効率特性

表２-１にコンバインドサイクルとの特徴比較を示す。

まず、運用性に関して、蒸気タービンや排熱回収ボイラの暖機運転が不要のため起動時間が短くできる。高湿分燃焼によりＮＯｘ低減できるため、低負荷で加湿開始することで運用負荷帯を広くすることができる。吸気噴霧冷却により高気温時の出力低下を抑制し大気温度特性が改善し、制御もガスタービン制御が主でシンプルである。

環境性については、高湿分燃焼により低 NO x を図り、脱硝のためのアンモニア消費をなくす、もしくは消費を抑制できる。また、ＡＨＡＴは 60℃程度の比較的高い温度の回収水を 30℃程度に冷却するので、冷却方式に空冷のクーリングタワーを使用することができる。コンバインドサイクルでは蒸気タービン出口で 30℃程度と低温であり空冷では設備が大規模になるため、海水を用いた復水器を使用している。AHAT では復水器がないので沿岸でなければならないなどの設置場所の制約がなく、内陸部にも設置可能である。

経済性については、蒸気タービン系統が無いので構成がシンプルで工期も短く、メンテナンス費用も少なくできる。配管、水質管理、ユーティリティ消費がコンバインドサイクルと同等とみなしたとしても、ＡＨＡＴは運用性、環境性、経済性に優れたシステムであるといえる。

表２－１　ＡＨＡＴとコンバインドサイクルとの特徴比較

◎:特に優位　○:優位　－:同等

項目		AHAT		コンバインドサイクル
運用性	起動時間	◎	ST系なく、起動時間短い	ST　HRSG暖機要
	負荷即応性	◎	GT単独運転並み	ベース
	最低負荷	◎	高湿分燃焼により低負荷で運転可能	低NOｘ安定燃焼の制限
	大気温度特性	○	吸気噴霧冷却:高気温時の出力低下小	GTおよびST出力低下
	制御	○	GT 制御が主でシンプル	GT 、ST 制御あり
環境性	NOｘ対策	○	GT:高湿分空気燃焼、GT排気:必要に応じ脱硝装置	GT:低NOx燃焼器、又は、水噴射、又は蒸気噴射、GT排気:脱硝装置
	立地制約	◎	水回収水温60℃程度:冷却塔冷却 内陸部にも設置可能	ST出口温30℃程度:復水器冷却 沿岸(海水への温排水)
経済性	機器構成、工期	◎	ST系なく、構成シンプルで工期も短い	ベース
	配管	－	GT 圧縮機吐出圧力低く、薄肉 ただし、再生サイクル配管径大	HRSG 高圧系圧力高く、肉厚 ただし、主蒸気配管径小
	水質管理	－	水処理装置(イオン交換樹脂等)設置	薬注による　pH 調整
	ユーティリティ消費	－	純水(圧縮機吸気噴霧冷却用),ｱﾝﾓﾆｱ(脱消用)、冷却水(冷却塔補給用)	純水(HRSGﾌﾞﾛｰ補給用)、ｱﾝﾓﾆｱ(脱消用)、冷却水(補給用)
	メンテナンス費用	○	構成機器少ない(排熱回収系、水回収系)	排熱回収系、ST系、復水器系

GT:ガスタービン、ST:蒸気タービン、HRSG:排熱回収ボイラ

（２）開発目標の設定

ＡＨＡＴの最終目標は、天然ガスを燃料とした 10 万ｋW 級中容量高湿分空気利用ガスタービンシステムにおいて、送電端効率 51%、NO x 排出濃度 10ppm 以下（16%O2）を達成することにある。

これを達成するための本事業におけるＡＨＡＴの研究課題を図２-３に示す。テーマ（１）～（４）はＡＨＡＴの信頼性を確保する以下のガスタービン技術の開発(高信頼性化技術)である。

（１）：高湿分圧縮機における非定常性挙動予測等の信頼性向上に向けた技術の開発

（２）：圧縮機動力の低減や発電効率及び信頼性向上に向けた吸気噴霧　液滴の蒸発促進技術

（３）：高湿分冷却翼における主流ガス熱負荷低減に向けた技術の開発

（４）:LNG 以外の燃料（バイオガス等）も利用可能となる燃料多様化に　向けた高湿分燃焼技術の開発

テーマ（５）～（７）は、AHAT システムの長期信頼性等の実証を行うための、以下の技術開発(実証機による長期信頼性の検証)である。

（５）：実証プラント製作に向けた主要機器のスケールアップ技術の開発

（６）：40MW 級総合試験装置を用いたデータ検証・実証プラントへの反映

（７）：実証プラントを用いた AHAT システム全体の長期信頼性等の実証

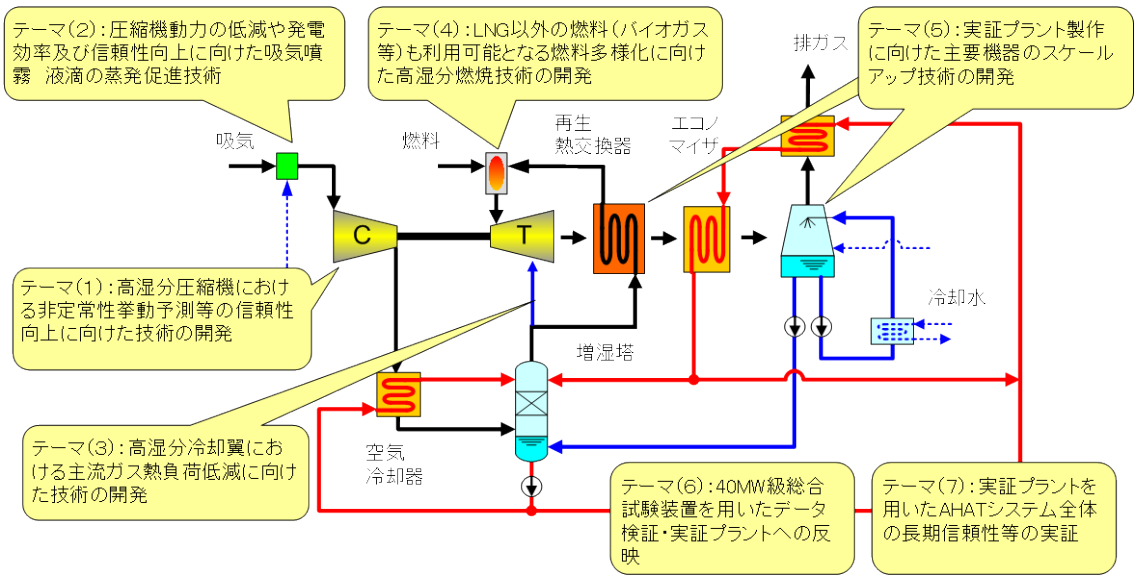


図２－３　ＡＨＡＴの開発課題と本事業の目的

最終目標を達成するためにこれらテーマで開発すべき革新的技術の内容とそ

の具体的数値目標、及び中間評価時点の目標を以下に示す。

（１）高湿分圧縮機

〇目標値：吸込流量 20%削減と圧縮機信頼性確保の両立

AHAT システムではシステム性能向上のため､圧縮機吐出空気に対して加湿を実施する必要があるが、この際流量バランスを維持するために圧縮機の吸込流量を低減する必要がある。ここで流量低減量としては加湿時に圧縮機吐出空気が飽和湿り空気となる、約 20%を想定している。この流量低減を既存のガスタービン圧縮機をベースとして達成するには圧縮機流路の改造が必要となるが、その際の有力な手法に圧縮機翼のケーシング側（外周側）をカットするチップカット技術がある。ただしチップカットによって翼高さが減少し、全体の流れに対して内周側と外周側の壁面部によって発生する流れの乱れの影響が大きくなるため、圧縮機の性能および空力的信頼性（サージマージン等）が低下する傾向にある。このため、圧縮機性能低下を抑制し、かつ信頼性を確保するチップカット技術が必要となる。チップカット技術を 40MW 級総合試験装置に適用し、実機試験によって開発技術の妥当性を確認することを目標とする。

〇中間評価時点の目標

既存のガスタービン圧縮機に対して適用可能なチップカット技術を確立する。

（２）吸気噴霧液滴の蒸発促進技術

〇目標値：噴霧量 3.5wt%以上と圧縮機信頼性確保の両立

ガスタービン圧縮機に対し､現状の最大実績である 1.5～2%以上の吸気噴霧を実施すると、吸気部での液滴蒸発による吸気冷却効果だけでなく、圧縮機内部での蒸発による中間冷却効果が十分に得られる。ただし噴霧量が 2%以上の場合、圧縮機内部への流入液滴増加による信頼性確保や、噴霧水量の増加による運用性確保が必要となる。このため、以下の(a)～(c)の技術開発が必要となる。(a)液滴衝突による減肉の抑制､(b)液滴蒸発に起因する圧縮機内翼負荷分布変化（図 3）に対する翼信頼性の確保、(c)および未蒸発液滴の低減による圧縮機下流側機器の熱応力低減。これら(a)～(c)に対する検討を実施し、検討結果を 40MW 級総合試験機に反映した上で 3.5%の噴霧試験を実施して妥当性を確認する。

〇中間評価時点の目標

上記(a)～(c)に対する検討を実施するための、3 次元数値解析と蒸発予測アルゴリズムを併用した予測手法を構築する。

（３）高湿分冷却翼

〇目標値：冷却効率静翼：70%以上、動翼：60%以上、かつ空力損失 10%低減

AHAT では、タービンの作動流体である主流ガスが約 20～25vol%の湿分を含

んでおり、タービン翼との熱伝達率が大きいことと、比熱比γが小さいことからタービン排ガス温度が従来ガスタービンよりも高温となる傾向がある。そのようにタービン翼の熱負荷が大きい状況で、冷却空気の使用量を低減するだけでなく、空力損失の低減も満足することにより、タービンの熱効率をさらに向上して、AHAT システムの優位性を図る技術を開発する必要がある。

〇中間評価時点の目標

熱負荷低減構造の考案と有効性の確認、およびタービン内部流れの詳細計測技術を開発する。

（４）高湿分燃焼器

〇目標値： NOx 10ppm 以下

AHAT 高湿分空気燃焼による低 NOx 効果を LNG 以外の多様な燃料に適用できれば、AHAT システムで利用する燃料の選択肢の幅が広がり、システムの普及を加速することができる。そのため， LNG 以外の多様な燃料に対する AHAT 高湿分燃焼器の設計技術開発が必要である。また，燃料の性状によって火炎温度、燃焼速度および燃焼ガスの比熱が変化し、燃焼器ライナへの熱負荷が増加することが考えられるため，それに対応できる冷却技術開発が必要である。

〇中間評価時点の目標

多様化燃料の燃焼特性評価技術および燃焼器冷却技術を開発する。

（５）スケールアップ技術

〇目標：再生熱交換器の大容量化、長期信頼性の確保、大容量化に適した水回収装置の検討

再生熱交換器には、高温、高圧かつ高湿度の環境で、ガスタービンの起動停止、負荷変動に伴う温度・応力が変動する条件で充分な耐久性と高い温度効率が必要。小型ガスタービンでは実用化されているが、それ以上のサイズでは実用化の例は僅かで(軍事用 WR-21(約 20MW)が最大)、更なる大容量にむけて大型かつ充分な耐久性を持つ再生熱交換器を開発する必要がある。

水回収装置に関しては、３MW 級検証機で独自のスプレイ式を開発し、加湿量の 95%以上を回収できたが、大容量化にあたっては、排ガスとスプレイの流れの空間的な均一化が開発課題となっていた。水回収装置の大容量化に適した方式を、放熱方式も含めて検討することが必要である。

〇中間評価時点の目標

再生熱交換器の大容量化を実現するために、製造技術の開発および長期耐久性を確保するための耐食性改良の検討を行う。大容量に適した充填物式の水回収装置を検討し、要素試験により水回収性能と、性能予測手法を検証する。

（６）40MW 級総合試験

〇目標：高湿分ガスタービンの構成機器の健全性確認、実証機の性能予測

40MW 級総合試験装置の運転により、各機器の運転特性、信頼性を確認して、実証機の設計に反映する。特に、圧縮機翼長短縮や圧縮機吸気噴霧に影響される圧縮機翼、高湿分条件で運転するタービン翼、再生熱交換器などの特性および信頼性の確認が必要である。また、運転データを分析し、実証機の性能を予測する。

〇中間評価時点の目標

総合試験の運転試験データを解析し、加湿のプラント性能への効果、部分負荷および起動特性を評価する。

（７）実証機試験

〇目標：システム全体の長期信頼性の実証

要素技術開発による機器の信頼性、性能の向上を反映して、実証機を設計、製作、運転により、システム全体の長期信頼性を実証する。

〇中間評価時点の目標

実証機の体制、方法の検討。

表２－２　ＡＨＡＴの研究目標・指標

要素技術	目標・指標（事後評価）	目標・指標（中間評価）	妥当性・設定理由・根拠等
(1)高湿分 圧縮機	圧縮機の吸込流量20%削減と信頼性確保の両立	チップカット技術の確立	フルAHATシステムの流量バランスを成立させるのに必要な削減量として20%を選定した。
(2)蒸発 促進技術	吸気噴霧量3.5%以上と 信頼性確保の両立	3次元数値解析と蒸発予測アルゴリズムの併用による予測手法の構築	既存の圧縮機に対して大幅な改造を伴わない限界噴霧量として3.5%を選定した。
(3)高湿分 冷却翼	静翼冷却効率70%以上、空力損失10%削減を両立する冷却技術の開発	・熱負荷低減構造の有効性確認 ・タービン内部流れの詳細計測技術の開発	AHATの優位性を損なわないため、高熱負荷条件でも冷却空気量と空力損失を低減できる技術開発が必要。
(4)高湿分 燃焼器	LNG以外の多様な燃料に対してNOx：10ppm以下となる高湿分燃焼器の設計技術開発	・多様化燃料の燃焼特性評価技術 ・燃焼器冷却技術	高湿分空気による燃焼では燃焼の不安定化が懸念される、低NOxと燃焼安定性の両立を勘案し設定した。
(5)スケール アップ技術	・再生熱交換器の大容量化、長期信頼性の確保 ・大容量化に適した水回収装置の検討	・材料面、構造面での信頼性確保技術の開発 ・充填物式水回収装置の性能検証、予測手法確立	・大型化により熱応力等が増大し、従来以上に材料、構造の検討が必要。 ・大容量化向きの充填物式の性能検証により、実証機仕様を策定する。
(6)40MW級 総合試験	・高湿分ガスタービンの構成機器の健全性確認 ・実証機の性能予測	・開放点検による機器健全性確認 ・定格出力による運転 ・部分負荷、起動特性の評価	・実証機設計の前に、定格出力による運転と機器健全性確認、不具合摘出が必要。 ・ユーザーとしては定格性能以外の部分負荷等の特性も重要視している。
(7)実証機 試験	実証機による、システム全体の長期信頼性の実証	実証機の体制、方法の検討	実用化に先立ち、商用機に準じた規模での長期信頼性検証が必要。

３　成果、目標の達成度

３－１　成果

３－１－１　全体成果

実施テーマ（１）～（４）の高信頼性要素技術開発、実施テーマ（５）のスケールアップ技術は、実証機の設計・製作に反映する目的で、それぞれの計画通り進められている。実施テーマ（６）の総合試験装置による試験は、内部開放点検の後、定格出力に到達することができ、運転データの分析を実施している。実施テーマ（７）の実証機試験は、日本再興戦略(内閣府、H25 年 6 月)による火力発電のさらなる開発加速に対応し、実証を前倒しで開始する方法を検討した。

３－１－２　個別要素技術成果

（１）高湿分圧縮機

AHAT システムではシステム性能向上のため、圧縮機吐出空気に対して加湿を実施する必要があるが、この際、圧縮機とタービンの流量バランスを維持するために圧縮機の吸込流量を低減する必要がある。そこで既存のガスタービン圧縮機に対する流量低減案として、図３-１-Ａに示す 3 つの流路形状改造案((1)チップ径カット、(2)ハブ径アップ、(3)両者の併用）を検討した。検討結果として、図３-１-Ｂに圧力比－効率特性を示す。図３-１-Ｂより、チップ径カットによる流量削減は他の方法に比べて設計点圧力比におけるベース圧縮機からの効率低下が小さく、チップ径カットの有用性を確認することができた。

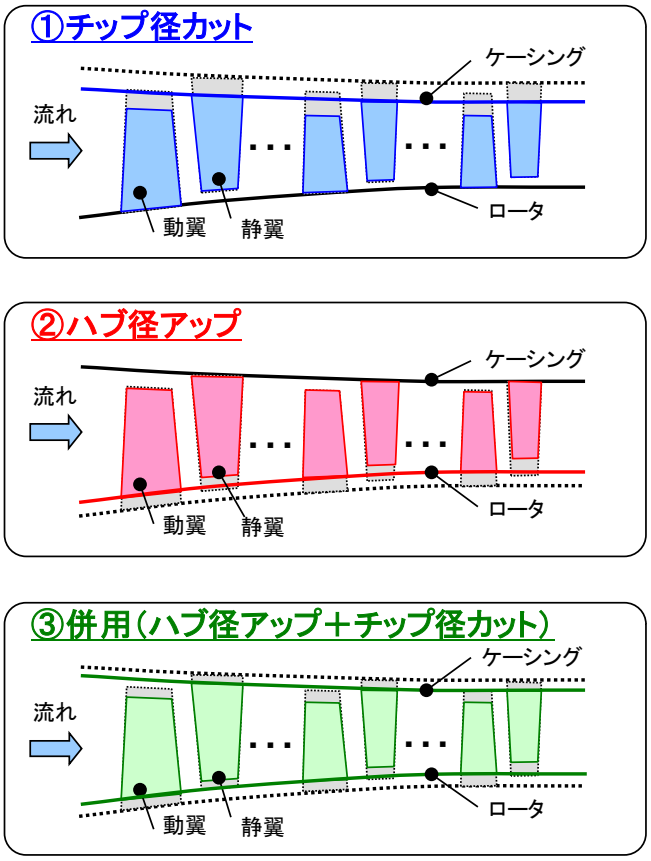


図３－１－A　流量低減を目的とした流路形状改造案

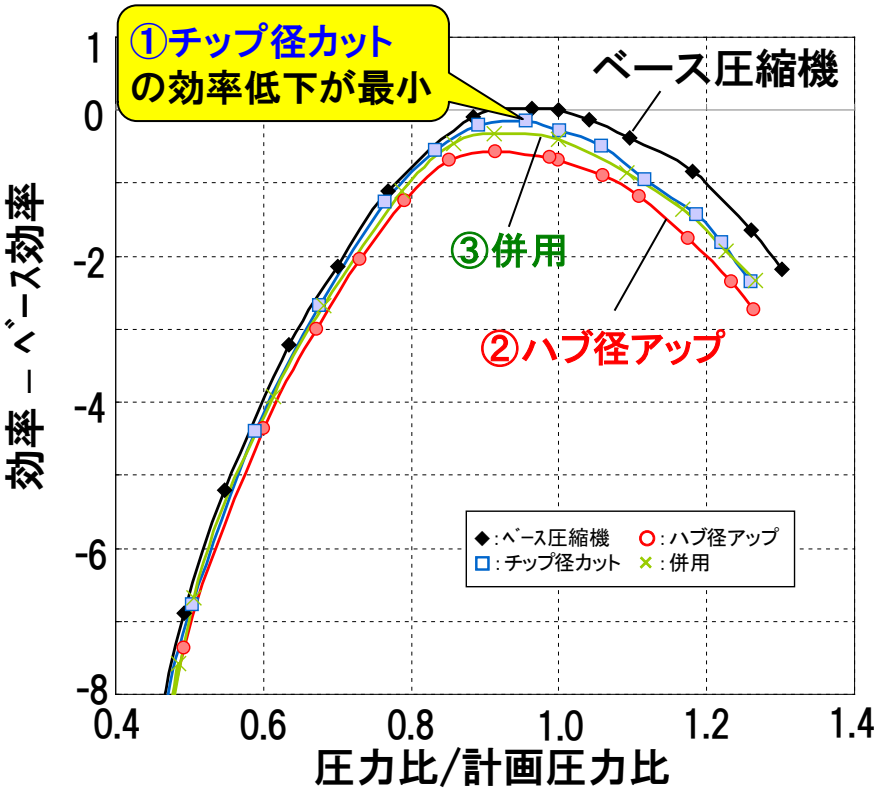


図３－１－B　流路形状改造案の圧力比－効率特性比較

以上の検討からチップ径カットの有用性が確認できたので、次にチップカット圧縮機に対して大気温度特性を考慮した最適設計を実施した。検討対象は前述の検討同様既存のガスタービン圧縮機（ベース圧縮機）で、チップカットによる流量削減量は 40MW 級総合試験装置の現在の加湿量とほぼ同量の 10%とした。結果として図３-１-Cに流量－圧力比特性を、図３-１-Dに圧力比－効率特性を示す。まず図３-１-Cおよび図３-１-Dより、最適化前はベース圧縮機に対する効率低下が大きかったが、最適設計を実施することでほぼ効率を維持することが可能となった。

空力的な信頼性については、チップカットにより翼高さが減少することで流路の内外周壁面部の流れの乱れが大きくなり、特に圧縮機の後段側では翼負荷が増加することで圧縮機全体のサージマージンの低下と翼振動の増加が課題になる。さらに AHAT システムでは圧縮機吐出から燃焼器までの圧力損失の増加により圧力比が増加するため、通常のシンプルサイクルガスタービンに比べてサージマージンが低下する。サージマージンは図３-１-Cに示すように、サージ圧力比と計画圧力比との裕度を表す指標であり、最適設計したチップカット圧縮機のサージマージンは、後段側で翼負荷が増加することでベース圧縮機より低減するが、実用上問題ない範囲で維持できる見込みである。今後は本開発技術を 40MW 級総合試験装置に適用し、実機試験によって開発技術の妥当性を確認する予定である。

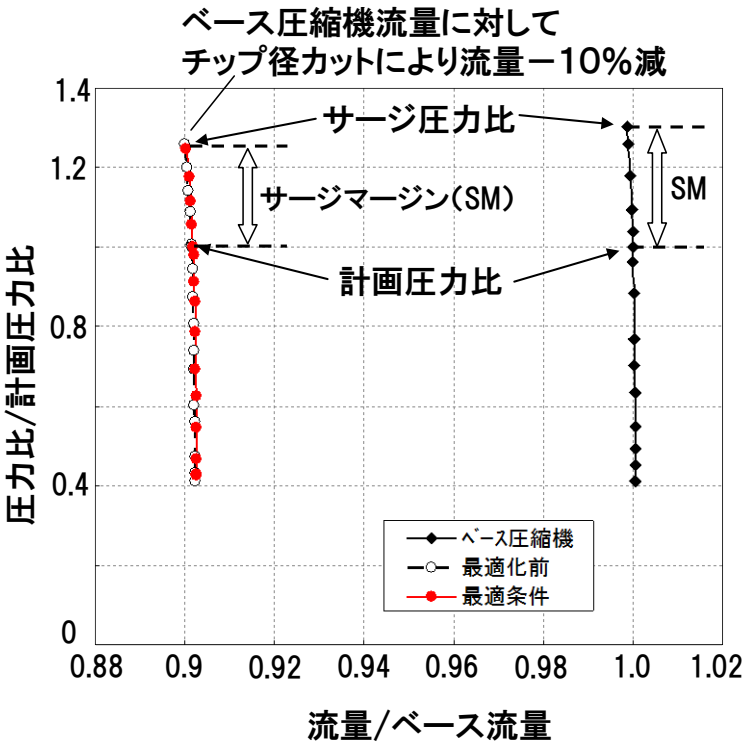


図３－１－C　最適設計時の流量－圧力比特性

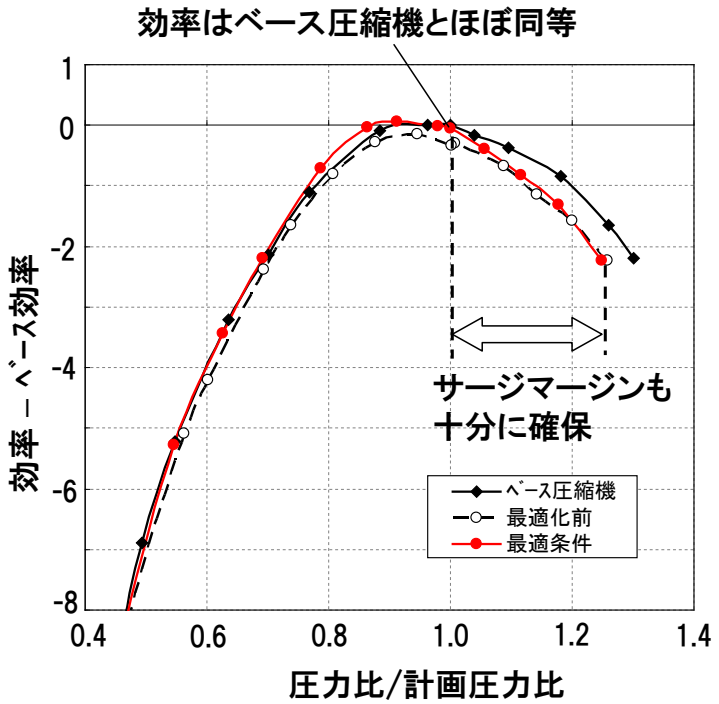


図３－１-D　最適設計時の圧力比－効率特性

（２）吸気噴霧液滴の蒸発促進技術

平成 23 年度までの実用化技術開発で構築した蒸発予測アルゴリズムでは考慮できなかった詳細な現象（例：圧縮機翼面に付着した液滴挙動）が模擬できるように、主流と液滴の総合作用をモデル化した 3 次元数値解析（CFD）の適用性を検討した。検討として単一液滴の蒸発実験と蒸発計算に対するトレース計算を実施した。結果として、液滴径の時間履歴を図３－２-A、３－２－Bに示す。これより、CFD の解析結果は実験結果や解析結果、および性能予測アルゴリズムと良く一致しており、CFD を実機設計や検討に使用可能な見通しを得ることができた。

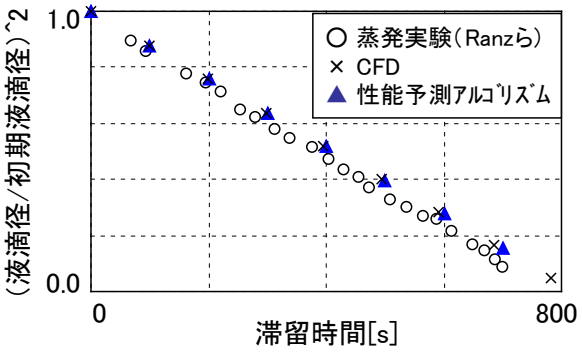


図３－２－A　液滴径時間履歴
（Ranz らの蒸発実験との比較）

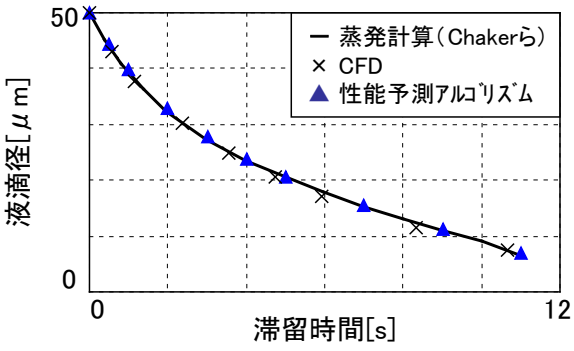


図３－２－B　液滴径時間履歴
（Chaker らの蒸発計算との比較）

前述の CFD を用い、40MW 級総合試験装置の圧縮機吸気ダクト部の液滴蒸発解析を行った。解析対象は図３－２－Cに示す通り吸気部の消音用のサイレンサダクト下流から圧縮機入口直前の吸気プレナムまでの範囲で、運転条件は定格出力（40MW）で吸気噴霧を実施した条件（Run69）とした。また噴霧条件としては全噴霧ノズルマニホールド（9 セット）を使用したケースと、そのうち 4 セットのみを使用したケースについて検討した。検討結果として、図３－２－Dに圧縮機入口部の温度分布を示す。図３－２－Dより、ノズルマニホールドを 4 セットのみ使用したケースでは噴霧液滴が局在化して圧縮機入口部に温度偏差が発生するが、ノズルマニホールドを 9 セット使用したケースでは前述の温度偏差はほぼなくなることが分かる。つまり噴霧量が少ない場合は噴霧液滴の局在化により吸気部での蒸発が不十分になる可能性があるため、これらの局在化を抑制する噴霧方法が必要なことが示された。今後は前述の噴霧方法だけでなく、ノズル配置やダクト形状が及ぼす影響も開発手法で検討し、3.5wt%噴霧時の蒸発性能の向上や発生ドレン量の低減を達成する予定である。同時に本手法を圧縮機内部流れに対しても適用し、液滴付着位置の予測による減肉対策の実施等によって圧縮機に対する信頼性向上も同時に達成する予定である。

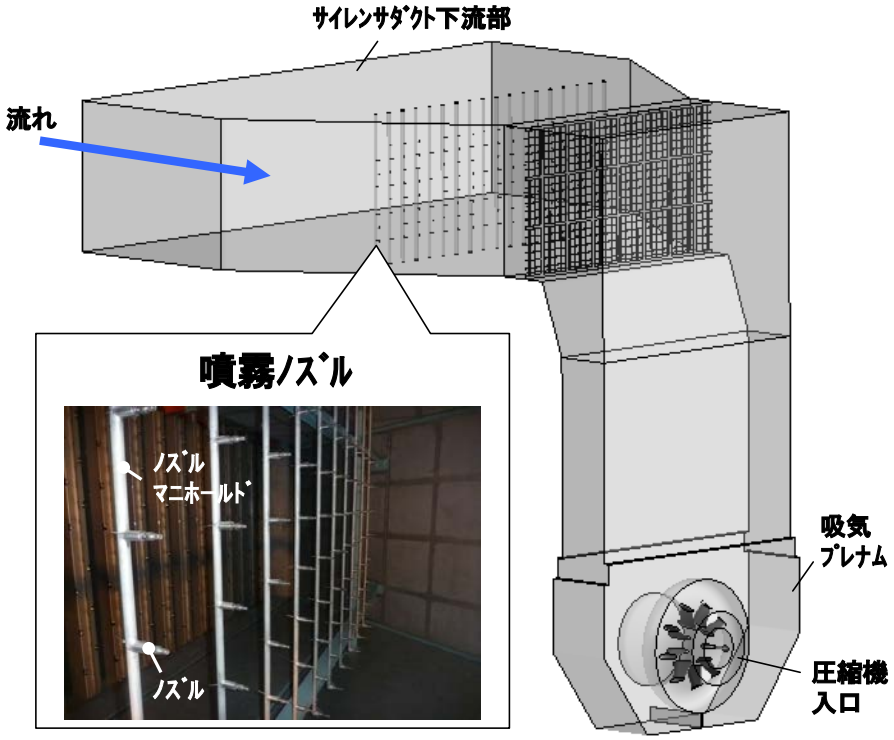


図３－２－C　吸気ダクト部解析領域

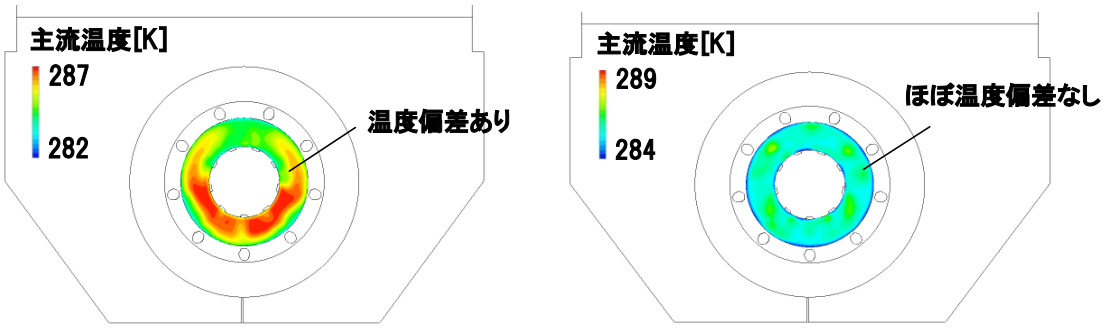


図３－２－D　圧縮機入口温度分布
（左：マニホールド４セット、右：マニホールド９セット）

次に、本開発している蒸発予測アルゴリズムを用いて 40MW 級総合試験の定格負荷（40MW）における、現状の最大液滴噴霧条件（1.6wt%噴霧）のトレース計算を実施し圧縮機内部流れ場を評価した。図３－２－E にドライと液滴噴霧時の動静翼の翼負荷分布を示す。液滴は圧縮機内部で完全に蒸発完了しており、蒸発完了段より上流側では蒸発効果によりドライ時に比べて翼負荷が低減している。一方、下流側では翼負荷が増加する傾向にあるが、翼負荷の指標は基

準以下であり液滴を最大噴霧したときでも空力信頼性は確保できていることが確認できる。

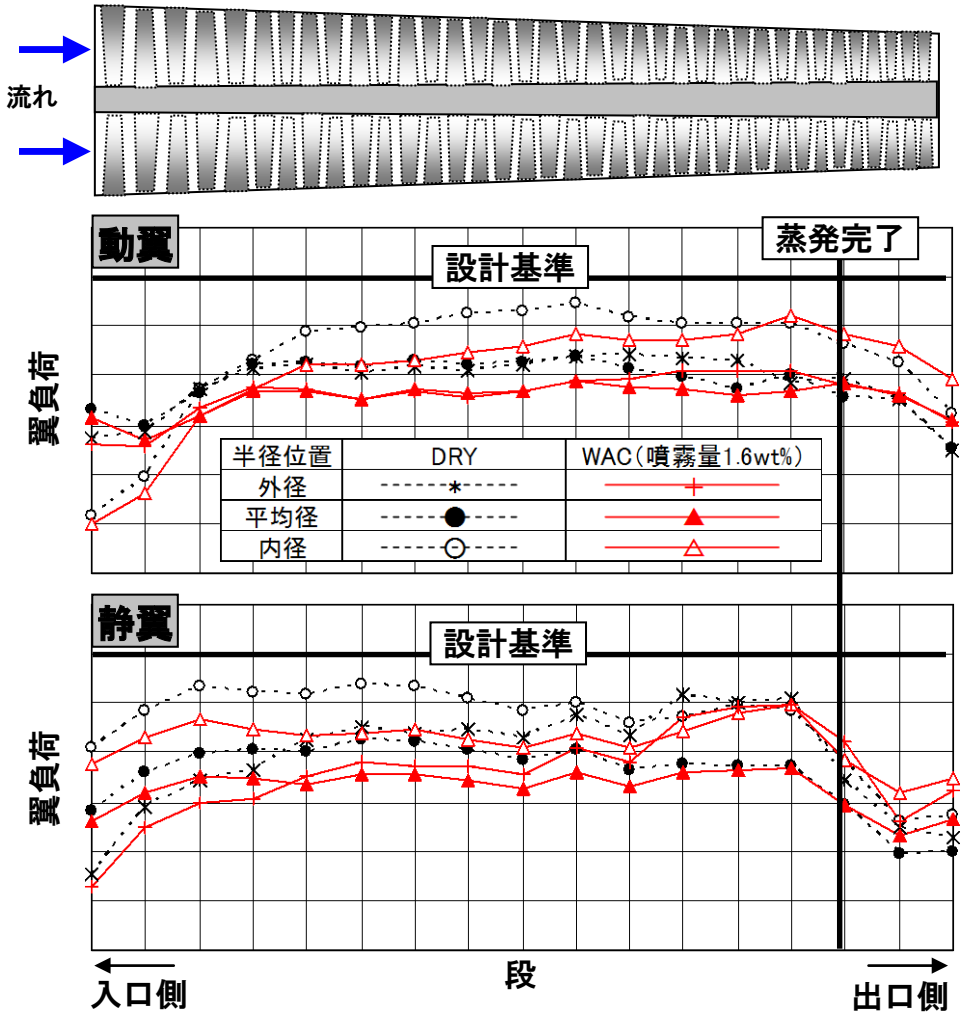


図３－２－E　翼負荷分布（定格負荷時の最大噴霧条件（噴霧量 1.6wt%））

（３）高湿分冷却翼

高湿分化によるタービン翼への熱負荷増大に対処するため、主流ガスの流れを制御することによりフィルム冷却性能を向上する高性能冷却構造を考案した。

図３-３-Ａに、基本冷却構造と数値流体解析に使用した計算格子を示す。流れ制御構造は回転楕円体の曲面からなる三次元形状となっており、フィルム冷却孔上流に設置することで主流中に渦対を発生させ、冷却空気の壁面への付着性を改善することを期待している。

図３-３-Ｂに、吹出比(BR)=0.5 の条件での数値流体解析結果を示す。フィルム冷却孔だけのケースと比較して、流れ制御構造付きのケースではフィルム冷却効率が高くなり、スパン方向への拡がりも大きくなっている。この結果、本構造では従来型円孔の約 4 倍のフィルム冷却効率を達成できる見通しを得た。

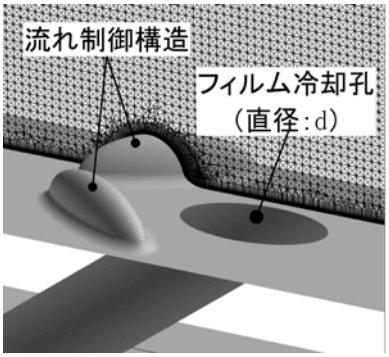


図３－３－Ａ　基本冷却構造と計算格子

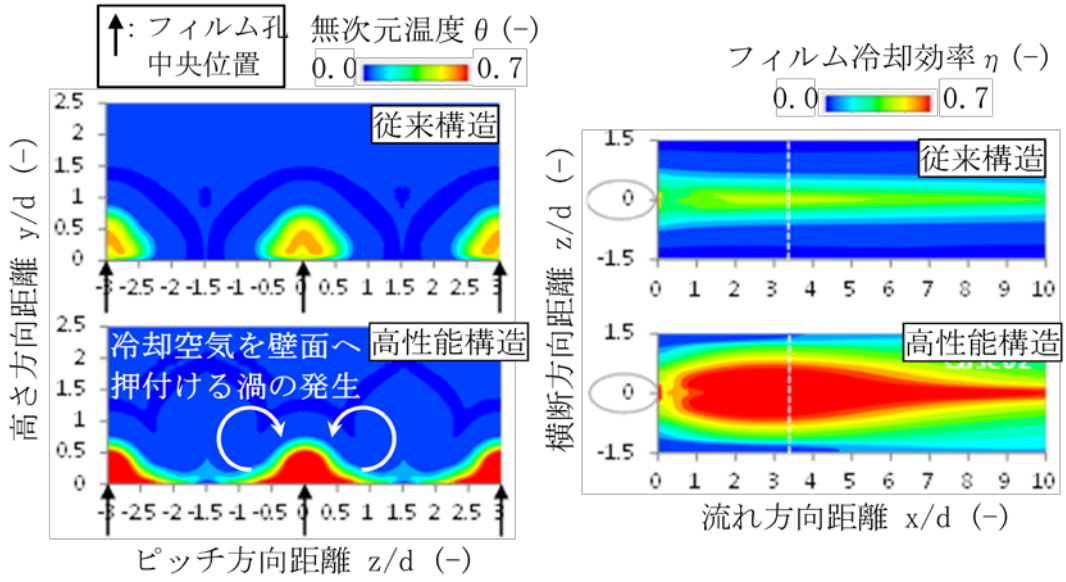


図３－３－Ｂ　数値流体解析結果（BR=0.5）

次に、冷却空気量と空力損失の低減を両立できる冷却技術の開発を目的として、ガスパス内の流れ場を正確に把握するため、図３−３−Ｃに示すような実機に近い形状の環状セクター翼列試験装置を設計・製作した。図３−３−Ｄに、計測装置を示す。本試験装置では、シール・リーク空気を考慮した翼周りの複雑な流れ場のと温度場の計測と、過渡応答法による表面熱伝達率とフィルム冷却効率の同時計測が可能である。今後、本試験装置を用いて、開発した冷却構造の冷却性能と空力性能を確認する予定である。

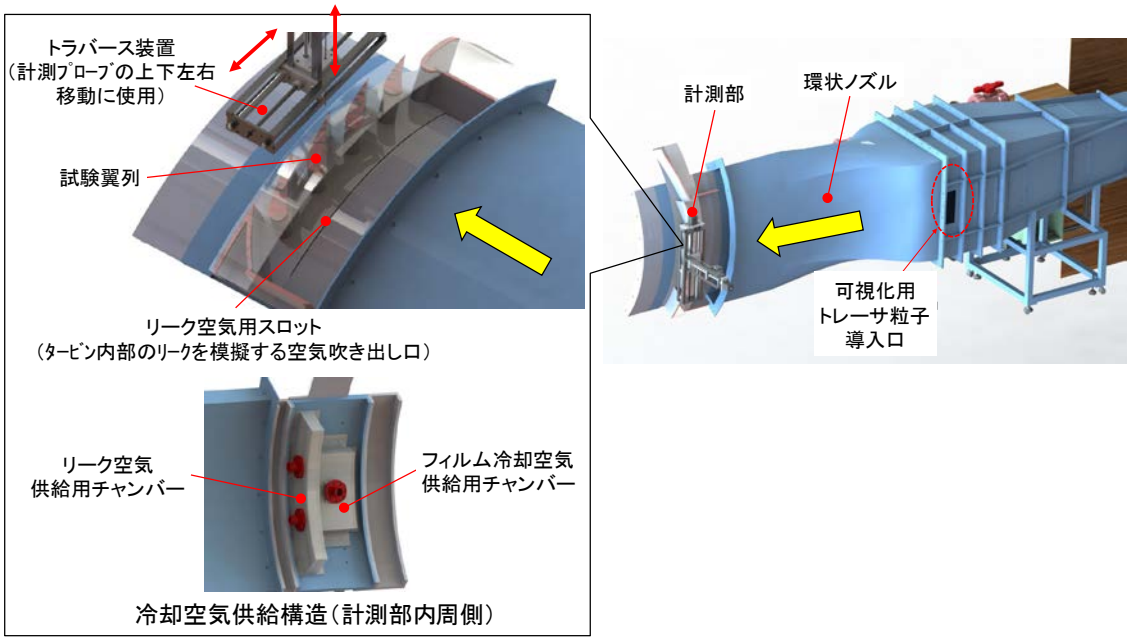


図３－３－Ｃ　環状セクター翼列試験装置

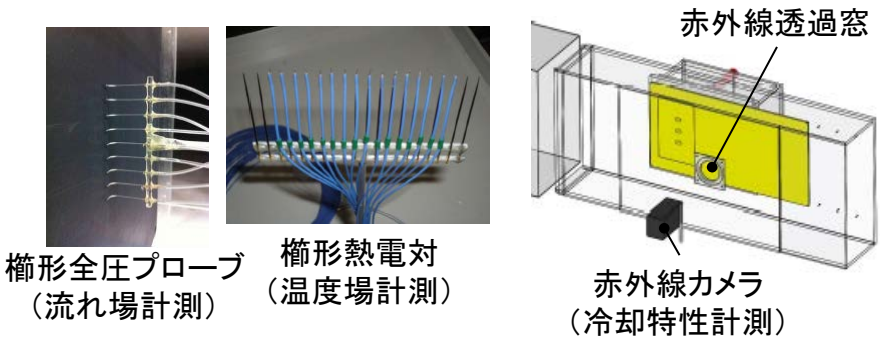


図３－３－Ｄ　計測装置

（４）高湿分燃焼器

燃焼器の開発に際しては，設計した燃焼器が設計どおりの性能を備えていることを燃焼試験で確認することが欠かせない。実際のガスタービンで燃焼試験を行なうことは費用，時間の面から制約があり，これまでは実寸単缶試験によって各種性能を評価してきた。燃料を多様化する場合，燃料の組成に応じた燃焼器設計技術を確立する必要がある。ところがそれを検証する際に，各種燃料の確保やそれぞれ流量を計測した後に混合して混合燃料とする設備の規模の制約があるため，実寸燃焼器の試験を繰り返すことは難しい。そこで，比較的小規模な試験で燃焼器各部の寸法パラメータサーベイを完了しておくことが必要となり，本事業では，多様な燃料に対する燃焼試験が可能な小規模バーナの大気圧試験装置を設計製作した。

本装置は，燃料を燃焼させ特性を評価できる燃焼スタンドとそれに付随する燃料供給系統，空気供給系統，蒸気供給系統，制御盤等から構成される。

図３－４－A　燃焼スタンド外観写真

図３－４－B　燃料供給系統外観写真

また，燃焼解析を用いて，燃焼器内部の燃焼状況を詳細に分析し，燃焼器の性能予測及び形状の影響を評価することで，燃焼試験前に試験パラメータを絞り込むことも重要である。さらに，CO を含む多様化燃料を用いる場合は，定格負荷条件だけでなく，部分負荷条件においても十分な燃焼効率を確保して CO の排出を抑制する必要がある。そこで，CO 排出量を評価可能な燃焼解析法を開発した。

図３-４-C に瞬時の燃焼器内の CO 濃度分布を示すが，本解析法を用いることで，ガスタービン燃焼器内の燃焼状態を詳細に分析し，性能に関わる CO の発生位置について検討することが可能となった。

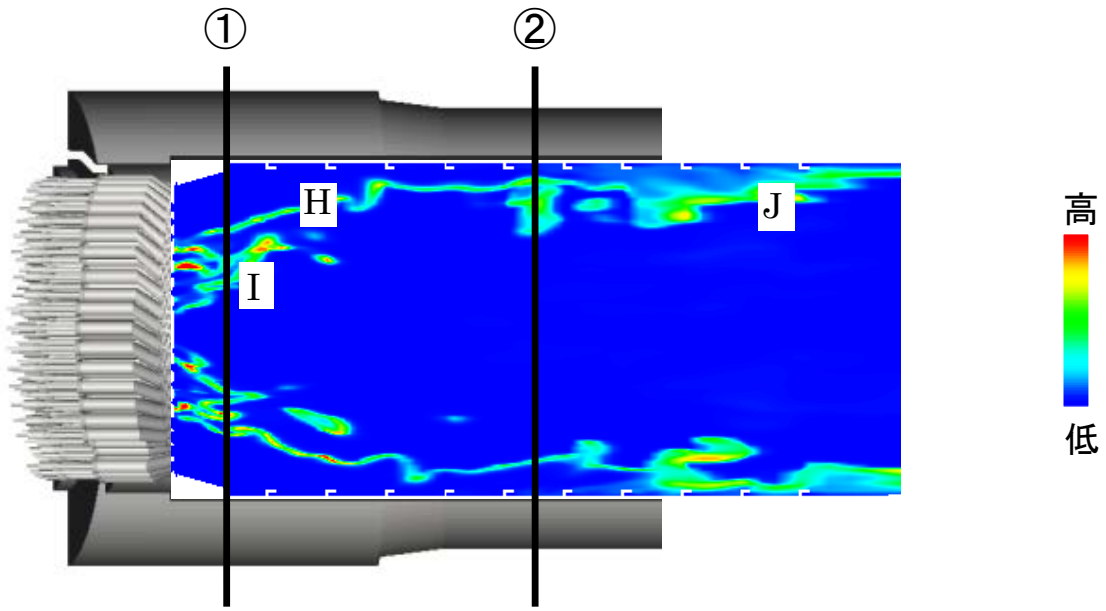


図３－４－C　燃焼器内 CO 濃度分布の解析例

水素含有量の増加や、放射熱が増大する輝炎の発生など，燃料多様化によってライナへの熱負荷が増加する。また，燃料組成の変化によって発熱量，断熱火炎温度が変化し，NOx が増加する可能性があり，NOx 発生を抑制するためにはライナ冷却空気を削減して燃焼空気に余裕を持たせる必要がある。そこで NOx 抑制とライナ熱負荷軽減を両立するため，フィルム空気レスのライナ冷却促進技術が重要となる。本研究では，対流のみによるライナ冷却促進技術として，縦渦発生器を用いたリブ冷却構造について，数値流体解析により検討した。図３－４－D に示すように，ライナ壁面近傍にまで及ぶ縦渦の影響によって，周方向に熱流束の大きな領域が現れ，縦渦による冷却促進効果があることが判った。

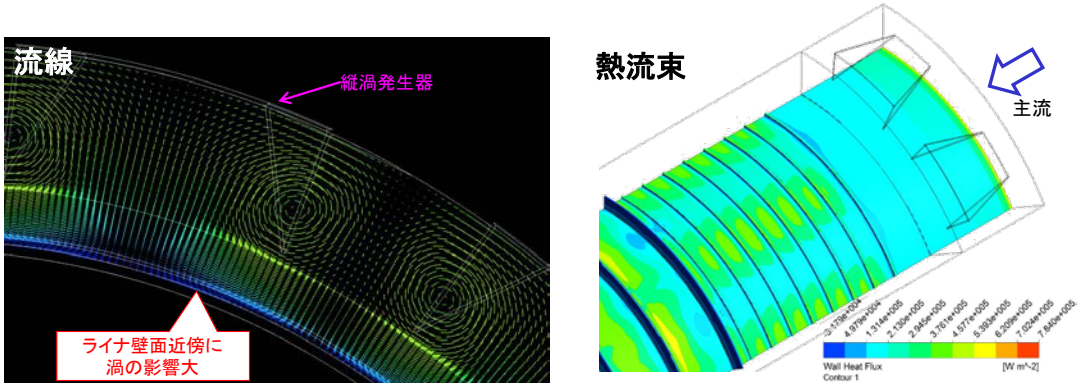


図３－４－D　数値解析結果

最後に，総合試験装置による試験運転については，長時間運転や大気温度変化に対する多缶燃焼器の信頼性検証を目的として，運転を継続中である。これまでガスタービンの負荷を増加させることにより，計画条件までの燃焼器運転を行なうことができた。その中で，短期間ながら燃焼性能および信頼性が維持できていることを確認でき，今後の信頼性試験が継続可能である見通しが得られた。

また，低 NOx 性能については，図３-４-E に示すように，最大負荷 48MW において約 1.5 時間のヒートランを実施した際の NOx 排出量は 24ppm であり，図３-４-Ｆに示す湿分－NOx の相関から，本結果は要素試験を再現しており，総合試験装置で加湿装置の湿分が飽和条件となる条件や，フル AHAT システムの増湿塔方式では，目標としている 10ppm 以下を達成できる見通しを得た。

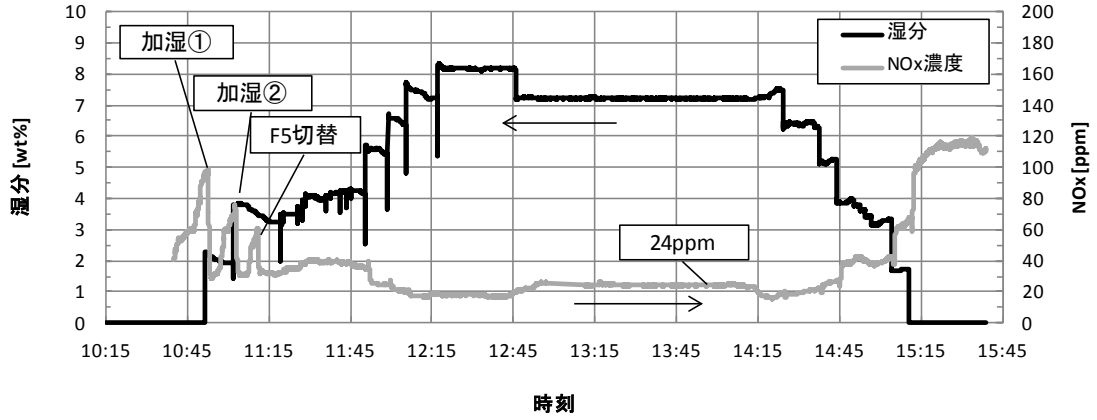


図３－４－E　最大負荷試験での湿分と NOx のトレンド

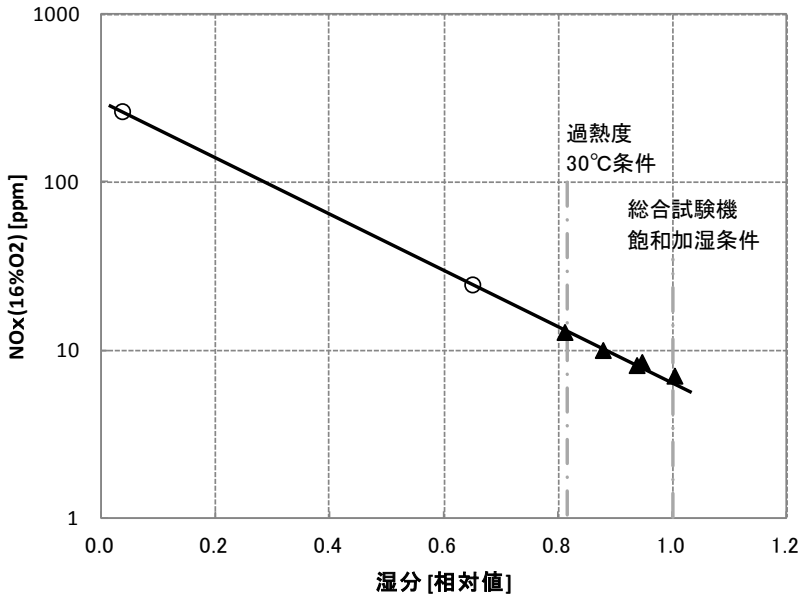


図３－４－F　NOx に対する湿分の影響

（５）スケールアップ技術

（５－１）再生熱交換器のスケールアップ

高湿分条件下で運転される再生熱交換器の材料面での信頼性確保技術開発として、熱交換器内面への表面処理開発を行った。プレートフィン型熱交換器の構造は複雑で一般的な表面処理が適用出来ないため、溶液に浸漬するだけで基材の材質に殆ど関係なく酸化物皮膜を成膜することができる液相析出法（LPD 法）での成膜開発を行った。

LPD 法は、図３－５－A に示すように、金属フッ化物（金属フルオロ錯体）の加水分解反応（析出反応）を、アルミ、ホウ酸などのフッ素イオン捕捉反応（析出駆動反応）を利用して加速し酸化物膜を析出させる反応で、成膜に対する制約は少ないが、金属へのコーティングは殆ど研究されていない。

表面処理したサンプルを、40MW 総合試験運転条件を模擬した高温繰り返し水蒸気酸化試験（580℃-1 時間保持×3000 回）を行った結果、40MW 総合試験用試験体に採用した UNS S31060 では高温酸化による重量増加が半減する効果が確認出来た。（図３－５－B）

一方、ステンレス表面に酸化チタン皮膜を成膜する条件は、従来行われているガラス等のセラミックスとは異なり、密着性や熱膨張収縮による微細クラックの発生や剥離の問題などが新たに確認された。（図３－５－C 左）

そこで、成膜の安定と改良を図るために検討を行い、キレート剤の添加と液の攪拌を行うことで、成膜の安定と成膜層のクラック発生を低減することが出来ることを確認した。キレート剤とは、金属イオンに対して複数の結合を形成して金属イオンを挟み込むような形で結合する薬剤である。（図３－５－C 右）

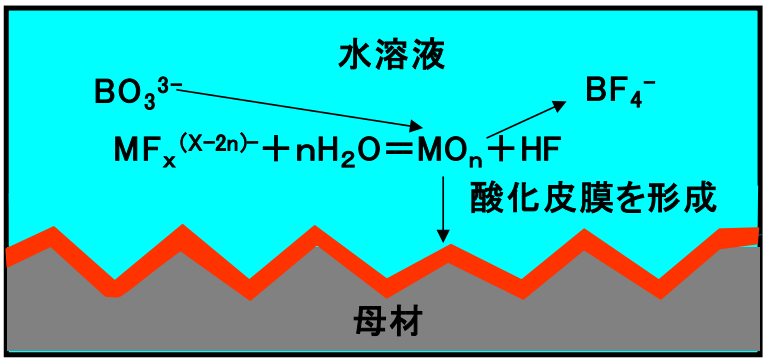


図３－５－A　LPD 法のメカニズム

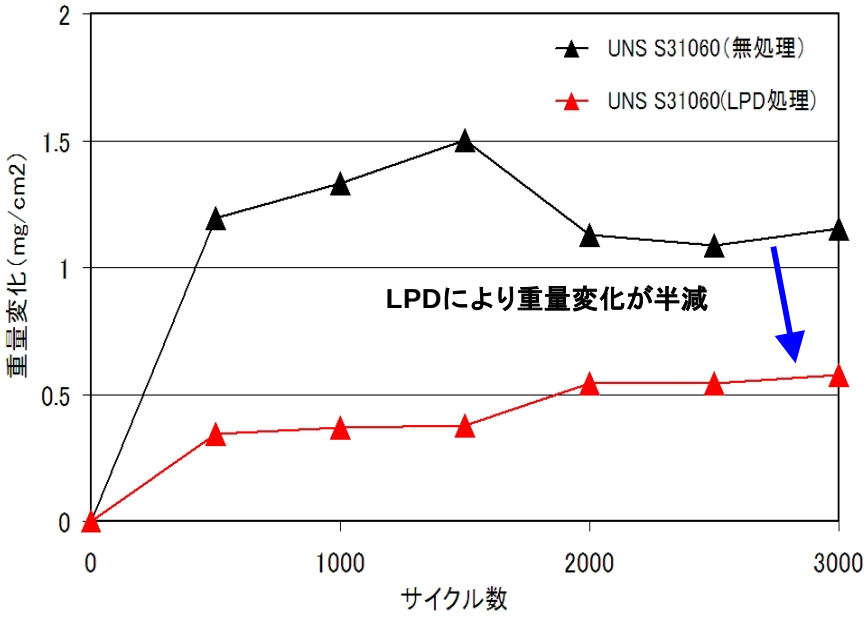
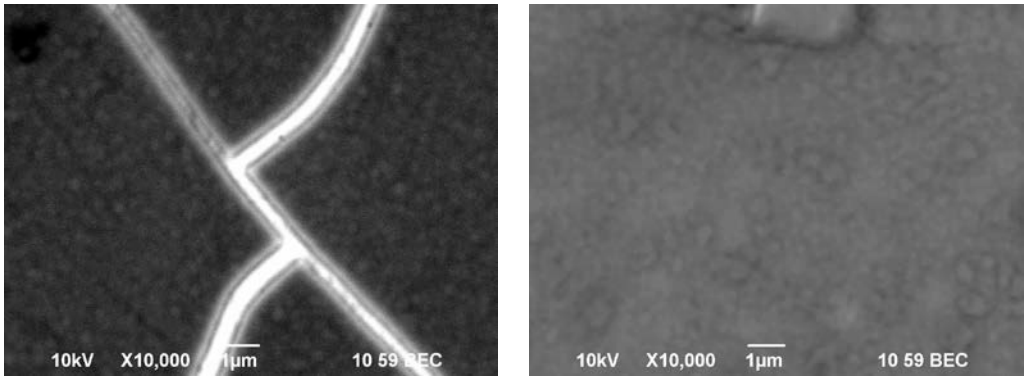


図３－５－B　　高温繰り返し水蒸気酸化試験結果



キレート剤なし（攪拌）　　キレート剤あり（攪拌）

図３－５－C　キレート剤の有無による LPD 法酸化皮膜の比較

構造面でのスケールアップ技術開発として、コア接続技術の研究開発を行った。熱交換器コアの製作段階における複数のコアを溶接で接続する工程でコア接続溶接部に溶接割れが発生してしまうと漏洩に至る可能性があり、品質および生産コストにインパクトを与える。製品の量産化に向けて、コスト、強度等の条件から材質の組合せも変わってくる可能性がある。そこで、材質を変えて開先形状や溶接条件の検討を試作コアによる溶接試験を行った。

試験の結果、溶接材質（母材・溶加材）の違いによる溶接割れの感受性が異なると最適組合せも異なることから、使用する条件での最適条件を事前に確認する必要があることが分かった。スペーサー深さは深くなるほど、またスペーサ

ー板厚は厚くなるほど、割れの発生は低くなる傾向が見られるが、スペーサー板厚 3mm で溶接条件の見直しや造り込みにより溶接割れを低減できる見込みを得た。

これにより、熱交換器本体高さを従来の 2000mm から 3000mm へスケールアップすることで増加するコア溶接接合部分の信頼性向上を図れることを確認した。

表３−５ーA　材質によるコア接合溶接試験結果比較（例）

			スペーサー厚さ t (mm)		
			2	3	5
SUS310S	スペーサー深さD (mm)	2	○	○	△
		3	○	○	△
			スペーサー厚さ t (mm)		
			2	3	5
SUS304	スペーサー深さD (mm)	2	○	○	○
		3	○	○	◎

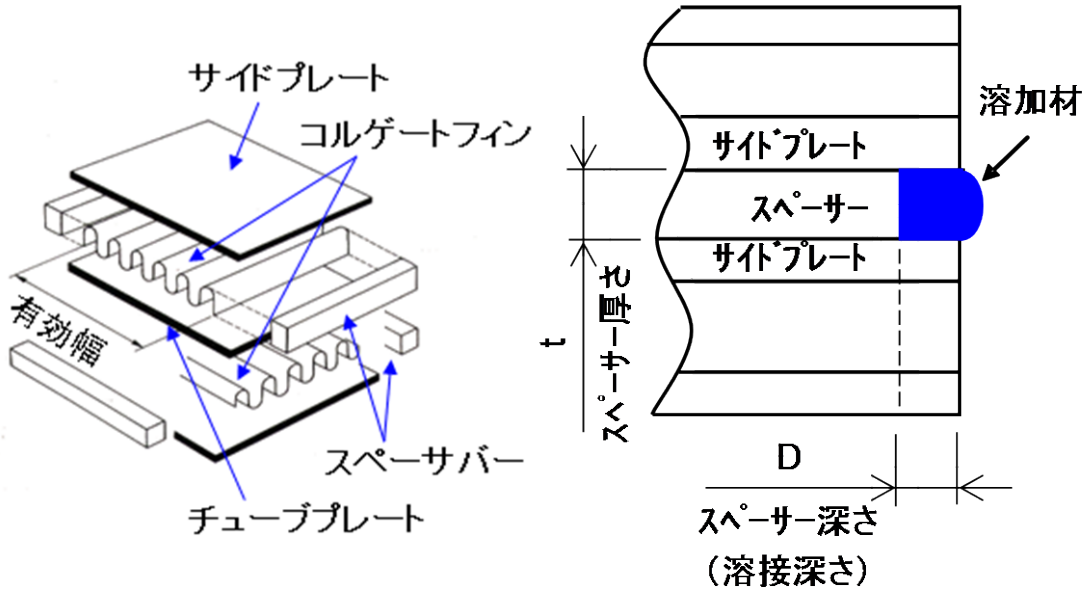
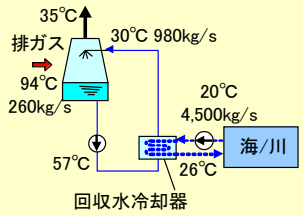
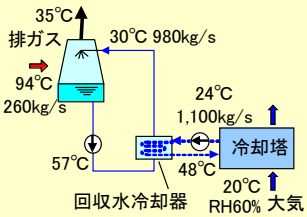
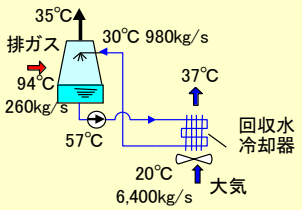


図３－５ーD　プレートフィン式熱交換器とコア接続溶接部開先形状

（５－２）水回収装置のスケールアップ

コンバインドサイクルは、蒸気タービンの復水器の真空度を高めて、効率と出力を高めるために、復水器へ供給する冷却水をより低温にする必要がある。一方、AHAT は蒸気タービンと復水器を有しておらず、外部への必要な放熱は、ガスタービン排ガスからの水回収のための凝縮潜熱が大部分となる。この排熱温度は、排ガスの露点温度で決まり、AHAT の定格運転条件では 50～60℃の高温となるため、放熱先との温度差を大きく取ることができ、大気によるラジエータ冷却(空冷)が比較的容易になる。その結果、AHAT の設置場所は、沿岸部以外に内陸部設置も設置可能となるため、海水冷却、冷却塔冷却、ラジエータ冷却(空冷)の場合の熱交換器のサイズなどを検討した。表３-５-B に示すように、国内で大部分の事業用発電設備に用いられる海水冷却と比較して、大気によるラジエータ冷却(空冷)は、熱交換器の伝熱面積は多く、機器コストが高価となり、発電コストに換算した場合は 0.17¥/kWh 程度の上昇となった。空冷式は、海水や工業用水が不要であるだけでなく、温排水も排出しないため、内陸部に AHAT を設置する場合の選択肢として有望であると考える。

表３－５－B　水回収装置の冷却方式比較（出力 150MW 想定）

冷却方式	(a) 海水/河川水	(b)冷却塔	(c)空冷(ラジエータ)
メリット	・冷却水補給不要	・温排水不要	・冷却水補給不要 ・内陸設置可
デメリット	・取水源、取水工事要 ・取放水温度差制限	・蒸発、飛散水補給要 ・水質調整、排水処理要	・伝熱面積(設置面積)大
構成			
伝熱面積	3,300 m²(プレート面片面)	8,400 m²(プレート面片面)	28,000 m²(チューブ内面)
熱交コスト	0.37 k¥/kW	0.93 k¥/kW	7.16 k¥/kW
所内動力	0.026 kW/発電kW (スプレイ水ポンプ:840kW 循環水ポンプ:3,100kW その他:290kW)	0.016 kW/発電kW (スプレイ水ポンプ:840kW 循環水ポンプ:770kW 空冷ファン他:1,020kW)	0.021 kW/発電kW (スプレイ水ポンプ:840kW 空冷ファン:2,140kW その他:420kW)
発電コスト*	ベース	－0.07 ¥/kWh	＋0.17 ¥/kWh

*機器コストと所内動力の影響による増減のみを評価

水回収装置の方式に関しては、3MW 級検証機で、独自のスプレイ式を開発し、加湿量の 95%以上を回収することができた。しかしながら、回収割合を高める為には、排ガスとスプレイの流れの空間的に均一な気液接触が必要であり、大型化の開発課題となっていた。大型化にあたり、ガスや散布水の流量分布が均等になり易い充填物式を選定し、性能検証のため、40MW 級総合試験装置の排

気ダクトに、図３-５-E のような約１/６０規模の水回収試験装置を追加設置した。放熱系統は空冷式とし、内陸立地への適用性を検証可能とした。図３－５-F に水回収試験装置の外観写真を示す。この装置は平成２５年６月から 40MW 級総合試験装置とともに運転を開始し、測定データを取得開始した。

平成２５年６月に取得した 4 ケースの運転条件と、水回収装置入口での排ガス条件、水回収量の測定結果、予測結果、回収量と加湿量の比較を表３－５-C に示す。水回収量の予測結果とは、水回収装置内部の充填物表面での熱・物質移動をモデル化して計算したものである。同表によると、水回収量の測定結果は、熱・物質移動モデルによる予測値の約 97%であり、充分な精度で水回収装置の性能予測が可能である。また、回収量と加湿量の比較によると、ガスタービンへの加湿量に対して、100%以上の湿分を回収でき、外部からの補給水を大幅に低減できる見通しを得た。

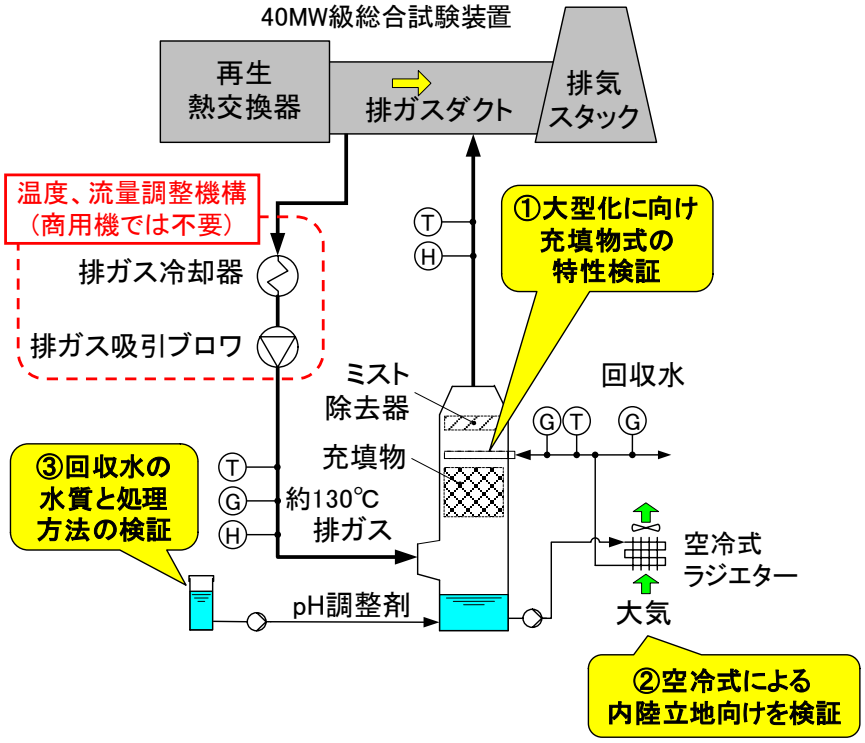


図３－５－E　水回収試験装置の概略

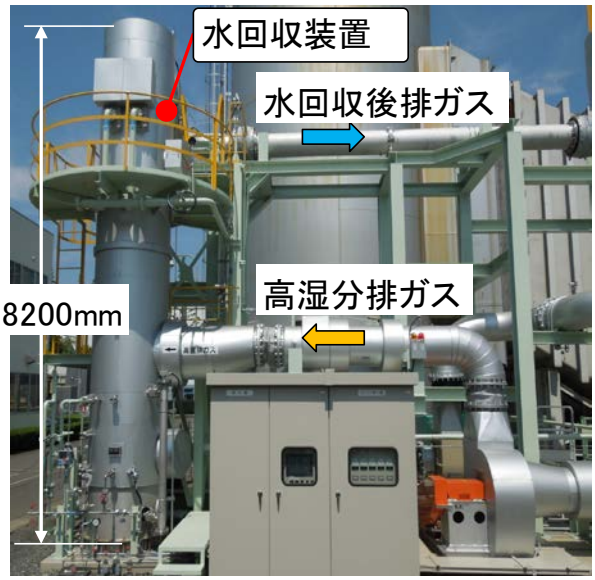


図３－５－F　水回収試験装置の外観

表３－５－C　回収水量の測定結果、解析との比較、加湿量との比較

ケース名			C1	C2	C3	C4	備考
ガスタービン	出力	MW	22	25	43	51	
	加湿量 (WAC蒸発量+加湿管蒸発量)	g/kg'	57	65	72	74	排ガス絶対湿度基準
水回収装置 散布水	流量	kg/s	7.7				
	温度	℃	33		38		
水回収装置 排ガス入口	流量	kg/s	2.2		2.1		全ガス量の約1/60
	温度	℃	125		130		エコノマイザ出口想定
	絶対湿度	g/kg'	93	104	117	124	
測定結果	測定結果 (排ガス絶対湿度基準)	g/kg'	60	69	70	79	
熱・物質移動 モデルによる 予測結果	予測結果 (排ガス絶対湿度基準)	g/kg'	61	71	73	82	
	回収量の実測/予測	%	98%	97%	96%	96%	平均97%
加湿量との 比較	回収割合 (回収量 / 加湿量)	%	104%	105%	97%	106%	平均103%

（６）40MW 級総合試験

40MW 級総合試験の目的は、高湿分ガスタービンの構成機器の健全性確認と、総合試験装置の運転特性確認による実証機の性能予測である。

（６－１）40MW 級総合試験の運転結果

図３-６-A に、40MW 級総合試験装置の構成と、本装置の主な検証内容を示す。図３-６-B に、システム機器とガスタービンの外観を示す。本装置は、事業用の重構造ガスタービンの高湿分空気利用ガスタービンへの適用性を検証することが主目的であり、加湿装置や再生熱交換器の能力は必要最小限に抑えてあり、空気冷却器、エコノマイザ、水回収装置などのプラント機器の設置は省略してある。加湿管は、スプレイ式の簡易なものであり、加湿量は増湿塔の場合の半分程度である。また、ガスタービン本体には、同図に示すように、圧縮機吐出空気をプラント側に抽気する配管も設けられており、この構造を確立することも検証項目の一つである。本装置は、平成２４年１月から運転開始し、同３月に 50%負荷まで到達したが、負荷の上昇に先立ち、平成２４年４月から９月まで、ガスタービンの内部開放点検を実施した。図３-６-C に示すように、内部開放点検の結果、加湿運転や過度な温度上昇による損傷は確認されず、健全性に問題無いことを確認した。この内部開放点検の後に、75%負荷の段階を経て、平成２４年１２月４日に初めて定格負荷以上に到達した(図３-６-D)。その後、38 回の起動、累計 50 時間の運転を実施し、高湿分ガスタービンの構成機器の健全性を確認した。

プラントの起動時間に関しては、図３-６-E に示すように、コールド状態で燃焼器点火から定格負荷の 40MW 到達まで約 60 分であった。これは、コンバインドサイクルの起動時間の約 1/3 に相当する。本装置は、エコノマイザなどの排熱回収系統を省略しており、エコノマイザを備えた商用機では起動時間が長くなる可能性があるが、一方、この時の運転は、負荷上昇や加湿量の操作が手動であり、自動化により起動時間が短縮される余地も残されている。今後、シミュレーションなどにより商用機の起動時間を評価する計画である。

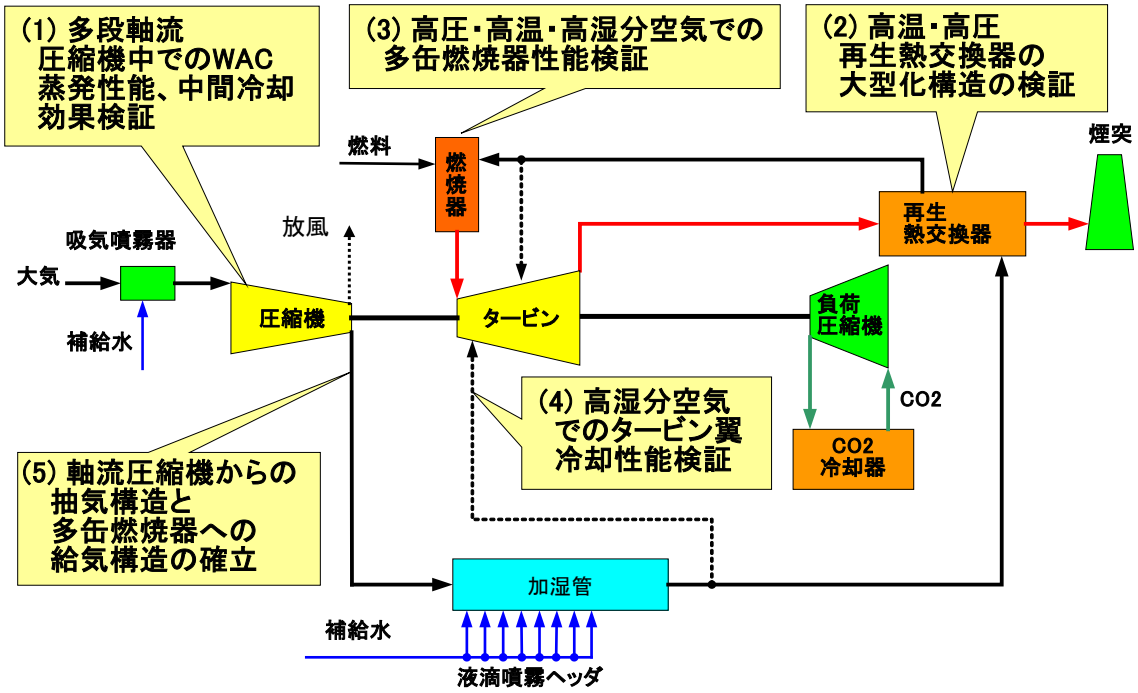


図３－６－A　40MW 級総合試験装置の構成と主な検証内容

(a)　システム機器　　(b) ガスタービン

図３－６－B　40MW 級総合試験装置のシステム機器とガスタービンの外観

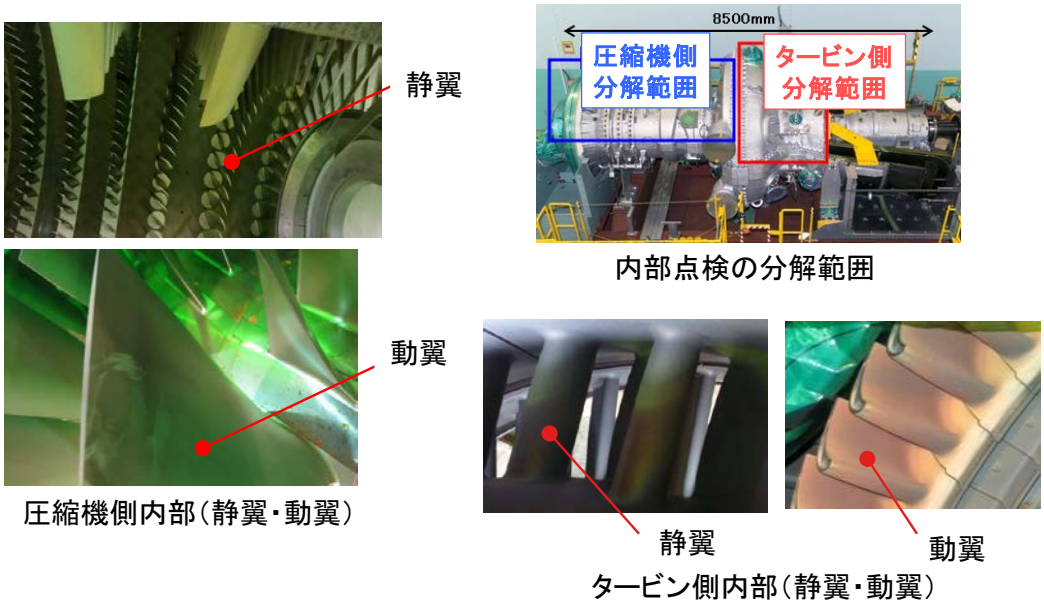


図３－６－C　ガスタービンのケーシング内部開放点検の結果

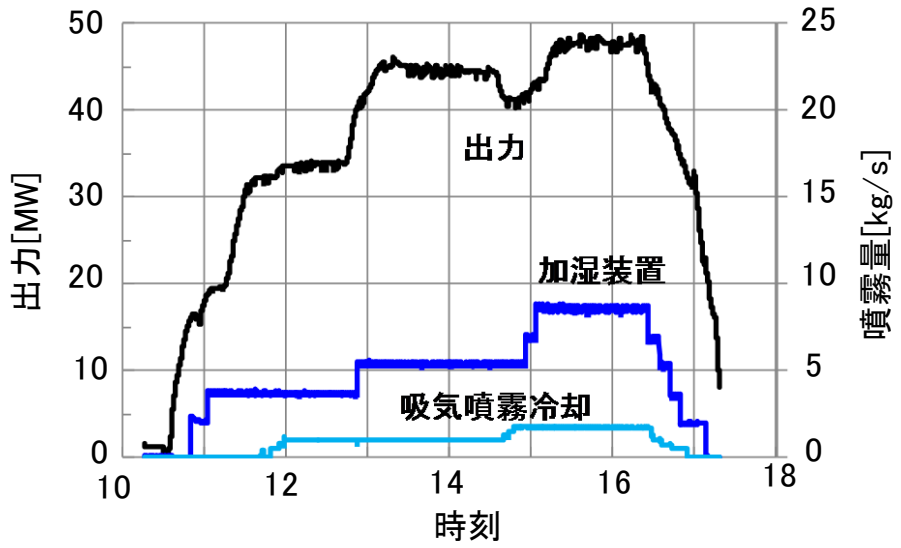


図３－６－D　初めて定格負荷を達成した日の運転曲線（2012 年 12 月 4 日）

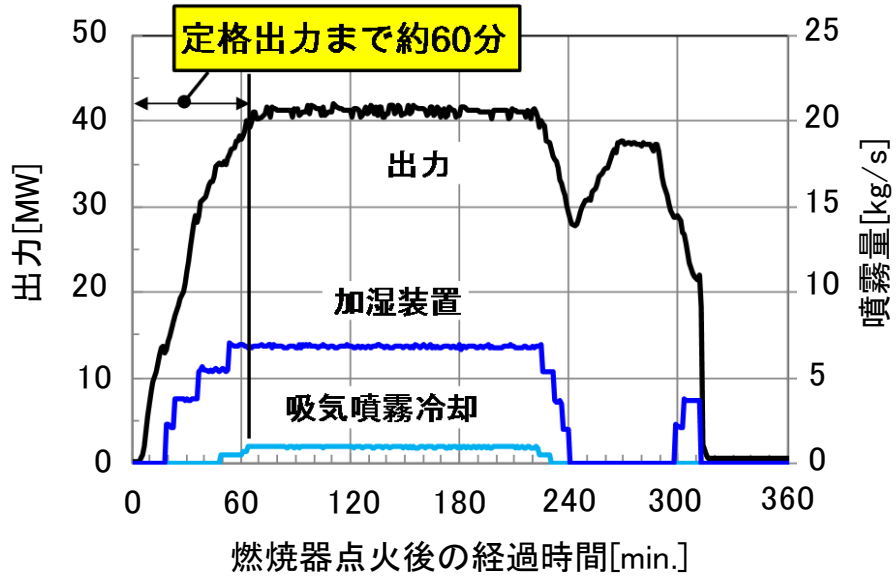


図３－６－E　コールド状態からの起動特性を示す例　（2012 年 12 月 13 日）

（６－２）40MW 級総合試験のシステム評価

まず、加湿によるプラント性能への効果の検証を行った。図 3-6-F に、水噴霧による加湿管出口空気中の湿分率増加に伴う、加湿管出入口温度差、再生熱交換器出入口空気温度差および再生熱交換器での熱回収量の変化を示す。本図が示すように、加湿による蒸発潜熱により加湿管出口温度（再生熱交換器入口空気温度）が低下し、再生熱交換器での伝熱が促進されて伝熱量が増加し、再生熱交換器出入口温度差が上昇している。湿分率が上昇するほど、これらへの効果が大きくなっており、加湿を行うことで熱回収量が増加することが分かった。

図 3-6-G に、各負荷における加湿による湿分率変化が熱効率に与える影響を示す（RUN67 の 48MW 出力時の熱効率を 100%とした場合の相対値）。47-48MW 出力時では湿分率の変化範囲が狭いため明確な変化は見られないが、それ以外の負荷ではどの負荷においても、湿分率の増加に伴い熱効率が向上している。負荷一定の条件で加湿を行った場合、燃焼温度が低下する。燃焼温度が低下すると、サイクルとしては熱効率が低下する方向にあるが、加湿による作動流体の重量と比熱の増加、また、図 3-6-F に示したように、再生熱交換器における熱回収量の増加により熱効率が向上したと考えられる。また、各負荷帯を比較すると、負荷が高いほど圧力比ならびに燃焼温度が高くなるため、熱効率は高いものとなっている。

吸気水噴霧冷却（WAC）のプラント性能への影響・効果を評価した。吸気水噴霧を行うことにより温度の低下が見られ、吸気の冷却効果が確認できた。また、WAC によって圧縮機出口空気温度の低下も見られ、圧縮機内部での冷却効果が確認できた。これらの効果による圧縮動力低減により、図 3-6-H に示すように、熱効率が約 2%向上することが確認できた。

図 3-6-I は、40MW 級総合試験装置の平成 24 年度試験結果による部分負荷特性と、3MW 級検証機および商用機を想定したシミュレーション結果を比較した図である。3MW 級検証機では、大きさの制約から遠心式圧縮機を用いたため IGV がなく、吸込空気流量による負荷制御ができなかった。そのため、熱効率に影響の大きい燃焼温度による負荷制御が主であった。また、約 50%以下の低負荷においては部分加湿モードであったこと、さらに、吸気水噴霧を定格出力付近に行ったことなどにより、シミュレーション結果より部分負荷での熱効率の低下が大きかった。一方、40MW 級総合試験装置では、IGV を備えており、吸込空気流量による負荷制御ができるため、部分負荷での熱効率の低下が 3MW 級検証機より小さいものとなり、また、商用機を想定したシミュレーション結果と近い結果が得られた。

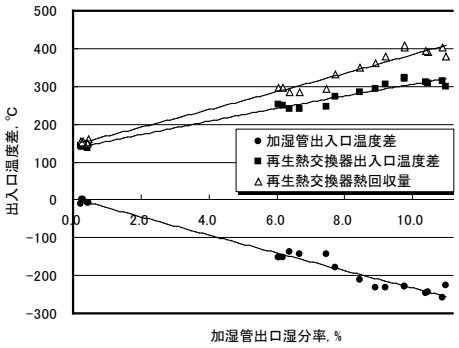


図 3-6-F 湿分率増加に伴う加湿管および再生熱交換器の出入口空気温度差、再生熱交換器での熱回収量の変化

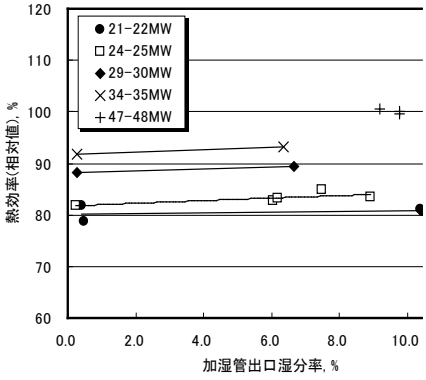


図 3-6-G 各負荷における湿分率増加による熱効率の変化

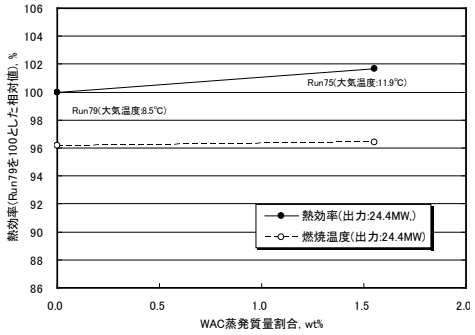


図 3-6-H WAC 蒸発質量割合に対する熱効率と燃焼温度の変化

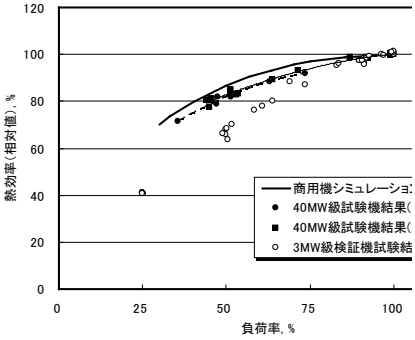


図 3-6-I 部分負荷特性の比較

（７）実証機試験

長期信頼性を検証するための実証機は、当初の計画では、平成 28 年度に詳細設計開始し、平成 30 年度中に完成し、平成 31 年度と 32 年度に運転する計画であった。実証機は、建設費が高額になるために、電気事業者や産業用ユーザーの参画が必要であるが、震災による民間企業の設備投資の抑制もあり、平成 25 年 11 月の中間評価の段階では、実証機の建設費を負担可能なユーザーは未定である。

そのような状況の中、日本再興戦略(内閣府、H25 年 6 月)が閣議決定され、高効率火力発電のさらなる開発加速が求められている。事業経費を低減し、実証を前倒しで完了させる方法として、図３-７-Ａの二段階実証を検討した。

AHAT の構成要素は、(A)高湿分ガスタービン、(B)再生サイクル、(C)加湿、(D)水回収 に分類され、これら４つの基本構成要素を同時ではなく二段階に分けて実証する方法である。第一実証では、(A)高湿分ガスタービン、(B)再生サ

イクルを実証し、第二実証では(A)高湿分ガスタービン、(C)加湿、(D)水回収を実証する。この第一実証は、建設済みの 40MW 級総合試験装置を改造して実施する。その際、排熱回収系を省略しているため、ガスタービンへの加湿量はAHAT フル構成の場合の半分程度であり、燃焼器やタービンの検証を充分に行うため、第二実証で排熱回収ボイラを追加設置して AHAT フル構成に匹敵する水蒸気を生成し、ガスタービンを検証する。また、第一実証に用いる 40MW 級総合試験装置には、1/60 規模の水回収装置が併設されているが、排ガスからの全量回収、水の再利用の実証のため、第二実証でフルスケールの水回収装置を設置する。ガスタービンの規模は、第一実証では 40MW 級であるが、第二実証ではガスタービンの高出力化により 70MW 級となり、商用機により近い規模となる。

増湿塔は実証機には設置されず、加湿管や排熱回収ボイラによる加湿になるが、増湿塔は化学プラントでスケールアップ実積のある塔槽機器であり、3MW 級検証機での実績からスケールアップ可能と考える。再生熱交換器は実証機の第二実証では非設置となるが、湿分に対する耐久性の影響は要素試験で確認済みであり、第一実証の結果と小型アセンブリによる熱サイクル試験結果で長期信頼性を評価できると考える。従って、この二段階実証により実質的に AHAT システム全体の長期信頼性を確認可能であると考える。

二段階実証の場合の工程は、平成 27 年度までは(A)高湿分ガスタービン、(B)再生サイクルを実証する第一実証を実施し、平成 28 年度から第二実証として(A)高湿分ガスタービン、(C)加湿、(D)水回収を実証するための建設、運転を実施する計画である。

40MW 級総合試験装置を一部活用した二段階実証により、出力規模とシステム構成が簡素化され、開発予算を圧縮でき、電気事業者や産業用ユーザーの参画が得やすくなると考えている。また、二段階実証では、建設期間が短縮でき、実証完了と実用化時期も早まり、日本再興戦略の開発加速要求に応えることができる。

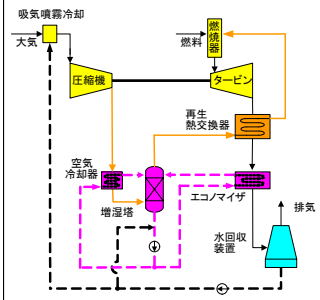
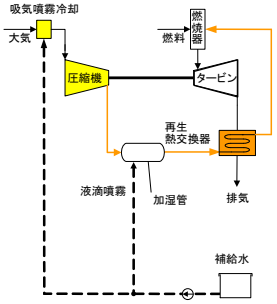
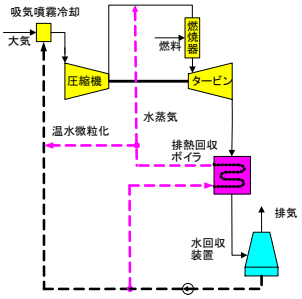
システム構成		AHATフルシステム	実証機の計画(二段階実証)	
			第一実証 (ガスタービン構造、再生サイクルの実証)	第二実証 (全量加湿、全量水回収の実証)
系統構成				
実証内容(網掛)	(A)高湿分ガスタービン	圧縮機	高湿分圧縮機、吸気噴霧冷却	高湿分圧縮機、吸気噴霧冷却
		タービン	(加湿量約半分)	全量加湿条件
		燃焼器	(加湿量約半分)	全量加湿条件
	(B)再生サイクル	再生サイクル配管	全量抽気構造	–
		再生熱交換器	全量熱交換	–
	(C)加湿	全量加湿	(加湿量約半分)	全量加湿
	(D)水回収	全量回収	(ガス量約1/60)	全量回収
実証の実現方法		電気事業者、産業用ユーザーの参画が必要 **(開始時期未定)**	本事業の40MW級総合試験装置で実証可能 **(～H27まで実証完了可能)**	・本事業の40MW級総合試験装置を改造すれば早期に実証可能**(H28～建設開始)** ・電気事業者、産業用ユーザーの参画でも早期に実証可能**(H28～建設開始)**

図３－７－A　実証機の形態の検討の検討結果

３－１－３　特許出願状況等

要素技術開発(2004年度から2006年度)、実用化技術開発(2008年度から2011年度)から通算した件数を表３-８に示す。ＡＨＡＴは、国内外の学会等で高い評価を得ており、海外発表で４回、国内発表で２回表彰されている。その中で、2010年6月にはアメリカ機械学会(ASME)から年間最優秀論文としてJ.P. Davis賞を与えられた。また、3MW級検証機、40MW級総合試験装置は、国内外の多数の顧客に視察頂き、ユーザーに関心を持たれている。

表３-８　特許・論文等件数

	要素技術開発				実用化技術開発				技術実証事業		
年度 項目	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	合計
論文･解説	0	2	1	2	3	3	4	8	3	1	27
特許(公開)	3	10	12	7	8	11	6	6	10	3	76
国際会議 発表	1	2	1	2	4	1	1	6	1	6	25
国内会議 発表	2	0	5	7	5	1	3	1	5	11	40

３－２　目標の達成度

各項目の成果を示す。

（１）高湿分軸流圧縮機

既存のガスタービン圧縮機に対する流量低減案を検討し、チップ径カットによる流量削減方法の有用性を確認した。さらにチップカット圧縮機に対して大気温度特性を考慮した最適設計を実施し、目標効率の達成と空力的信頼性（サージマージン）の確保を両立できる見通しを得た。

（２）蒸発促進技術

主流と液滴の総合作用をモデル化した 3 次元数値解析（CFD）の適用性を検討し、CFD を実機設計や検討に使用可能な見通しを得ることができた。さらにCFD を 40MW 級総合試験装置の圧縮機吸気ダクト部の液滴蒸発解析に適用し、噴霧量による噴霧状態の相違について検討した。

（３）高湿分多缶燃焼器

多様化燃料使用時のバーナ燃焼特性を評価するため，模擬燃料（メタン，水素，窒素混合燃料）を燃焼可能な要素燃焼試験装置を開発した。また，燃料多様化燃焼器の開発に必要な燃焼解析技術，冷却促進技術を開発した。

（４）高湿分冷却翼の開発

高性能フィルム冷却構造を考案し、数値流体解析により従来構造の約 4 倍の平均フィルム冷却効率達成の見通しを得た。またタービン内部流れの詳細計測が可能な試験装置を設計・製作した。

（５）スケールアップ技術

再生熱交換器のスケールアップ技術開発として、材料面での信頼性確保技術開発である LPD 法による表面処理の改良を行い成膜厚さの増加とクラックの低減を実現した。構造面でのスケールアップ技術開発としてコア接続技術の研究開発を行い、材質を変えて開先形状や溶接条件の組合せによる最適なコア接続溶接の条件を確認した。

（６）40MW 級総合試験

ガスタービンの内部開放点検により、加湿運転後の健全性に問題ないことを確認した。定格出力により一定時間(ヒートラン)運転し、高湿分ガスタービンの構成機器の健全性を確認した。

システム評価では、加湿により排熱回収量増加し、各負荷で熱効率が向上することを確認した。また、吸気水噴霧により圧縮動力が低減され熱効率が向上することも確認できた。さらに、吸気流量による負荷制御により高い部分負荷特性が得られた。

（７）実証機試験

長期信頼性を検証するための実証機の形態を検討した。事業経費を低減し、実証を前倒しで完了させ、早期に実用化するために、AHAT の４つの基本構成要素を二段階に分けて実証する方法を検討した。

以上の成果により、中間目標を達成することができたと考えており、達成度一覧を表３-９に示す。

表３－９　目標の達成度一覧

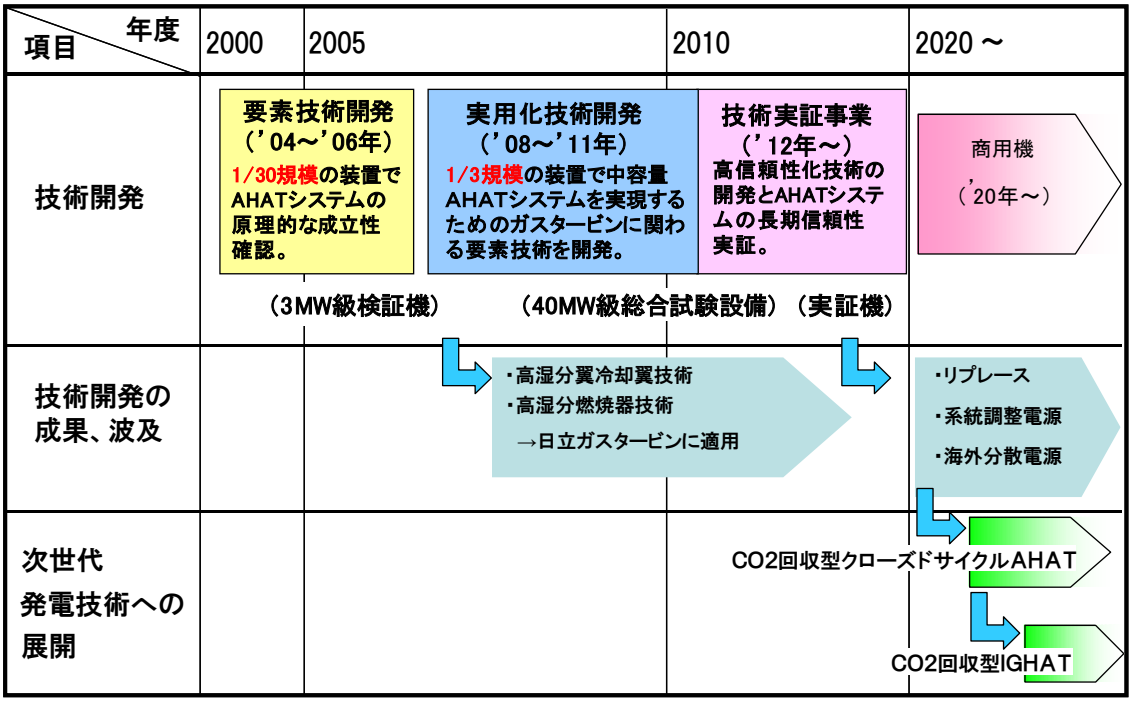
要素技術	目標・指標（中間評価）	成果	達成度
(1)高湿分 圧縮機	チップカット技術の確立	既存の圧縮機に対する流量削減方法を検討し、チップ径カットによって効率達成と信頼性確保を両立する見通しを得た。	達成
(2)蒸発 促進技術	3次元数値解析と蒸発予測アルゴリズムの併用による予測手法の構築	液滴挙動の影響を組み込んだ3次元数値解析手法の妥当性を確認し、吸気部の解析に適用した。	達成
(3)高湿分 冷却翼	・熱負荷低減構造の有効性確認 ・タービン内部流れの詳細計測技術の開発	・熱負荷低減のための基本構造を考案し、解析により有効性を確認した。 ・タービン内部流れを模擬する環状セクター試験装置と計測装置を製作した。	達成
(4)高湿分 燃焼器	・多様化燃料の燃焼特性評価技術 ・燃焼器冷却技術	・要素燃焼試験装置を開発した。 ・燃焼解析，冷却促進技術を開発した。	達成
(5)スケール アップ技術	・材料面、構造面での信頼性確保技術の開発 ・充填物式水回収装置の性能検証、予測手法確立	・コア接合溶接の最適条件を検討、確認した。耐食処理条件を検討し、成膜品質の改良を確認した。 ・1/60規模の水回収試験装置を設計製作しデータ取得、性能予測手法を確立した。	達成
(6)40MW級 総合試験	・開放点検による機器健全性確認 ・定格出力による運転 ・部分負荷、起動特性の評価	・ガスタービンの内部開放点検により、加湿運転後の健全性を確認した。 ・定格出力により一定時間(ヒートラン)運転した。 ・加湿による効率向上、3MWより高い部分負荷特性が得られた。	達成
(7)実証機試験	実証機の体制、方法の検討	実証機の実施形態を検討した。	達成

４　事業化、波及効果について

４－１　事業化の見通し

高湿分空気利用ガスタービンの実用化に当たっては、世界で初めて実用化されるシステムであり、開発リスクが大きいことから、表４-１の商用機までのロードマップに示すように、段階を踏んで開発を進めることによりリスク低減を図り、確実に技術開発を進めることが必要である。

表４-１　ロードマップ



（１）技術開発について

2004 年度から 2006 年度まで 3 年間の要素技術開発を予定通り実施し目標を達成できた。3MW級の検証機を建設し、ガスタービンと吸気噴霧冷却、増湿塔、再生熱交換器、水回収装置等を組み合わせたＡＨＡＴシステムが原理的に成立することを確認した。効率は小容量クラスのガスタービンシステムで最高レベルの 36.4%(ＨＨＶ)(40%(ＬＨＶ))以上を達成した。また、シミュレーションにより中容量ＡＨＡＴシステムで従来の同出力機より高い発電効率が得られることを確認した。3MW級検証機は高湿分空気を利用した再生型ガスタービンとして世界初のシステムであるため、要素技術開発ではシステムの成立性確認を最優先項目とし、ガスタービンはシステムを原理的に検証するために必要最小規模の小容量クラスで実施した。

実用化技術開発については、2008 年度から 2011 年度までの 4 年間に、予定通りに完了した。商用機のＡＨＡＴシステムは出力 100MW級の中容量のヘビーデ

ューティー型ガスタービンであり、ガスタービンは小容量に比べて圧力が高く、多段軸流圧縮機、多缶燃焼器、冷却タービンの構成となるため、小容量クラスのガスタービンとは異なる。よって、中容量ガスタービンでＡＨＡＴシステムを実現するため、各ガスタービン要素の実用化技術開発とそれらの技術を組合せた商用機の 1/3 スケールの総合試験装置によりガスタービンにかかわる技術を開発した。

2012 年度からの技術実証事業の前半では、AHAT の信頼性を確保するガスタービン技術として、高信頼性化技術の開発を順調に進めている。技術実証事業の後半では、AHAT システムの長期信頼性等の実証のため、実証機を建設して実際に発電することにより、運用性、環境性、経済性の観点からＡＨＡＴを評価するとともに長期信頼性を確認する。実証機の形態としては、事業経費の低減と実証の早期完了、早期実用化の観点から、AHAT の構成要素を二段階に分けて実証する方法を検討中である。

なお、高湿分空気を利用したガスタービンシステムは、システム改良に主眼をおいた高効率化技術であり、1980 年に日本で考案された航空機転用型ガスタービンを利用する日本生まれの技術であるＨＡＴシステムが基礎になっている。その後、米国でシステム研究が行われ多くの派生システムが提案された後、1990 年代から電力事業用に使用されているヘビーデューティガスタービンに適用するように日本で再検討され、3MW級のＡＨＡＴシステム検証機によりシステム成立を世界に先駆け確認したことで日本が再び世界をリードしている。

ＡＨＡＴシステムは、夏季の出力低下が少ない（吸気噴霧冷却の効果）、部分負荷効率が高い（再生システムの効果）、起動時間が短い（蒸気タービン系が不要）、水回収により補給水が不要、設備費が低い、等の環境や電力需要への即応性が高いという点で好ましい特性を有しているが、日本独自の技術であるため前例がなく、商用機にいたるまでの技術課題が多い。産業界のみで本技術開発を進めていくにはリスクが高く、引き続き国の関与と支援が必要である。

（２）技術開発の成果、波及について

要素技術開発で開発した高湿分翼冷却技術については、対流冷却での伝熱促進技術を日立ガスタービンの冷却翼に適用しており、冷却空気量削減による高効率化、ＣＯ２削減に寄与している。また、要素技術開発で開発した高湿分燃焼技術についても、多孔同軸噴流技術を日立ガスタービンの燃焼器に適用しており、低ＮＯｘ化による環境負荷低減に寄与している。

IEA による世界エネルギー需要予測を図４-１に示す。天然ガスは、シェールガスなど非在来型ガスの掘削技術が開発され、世界的な需要拡大が見込まれる。また、電力中央研究所による、わが国の電源構成推移を想定した図を図４-２に示す。電力需要の増加に伴う LNG および石炭火力の新設、増設に加え、2010 年

頃からは 40 年を寿命と考えた場合、寿命を迎えるプラントが急増しリプレース市場が活発化すると考えられる。ピーク・ミドル運用に適した中容量ＡＨＡＴシステムは、新増設需要に加え、次のようなリプレース市場への導入も見込まれる。

・LNG 火力リプレース市場
・石油火力リプレース市場（燃料転換にも対応、ガス焚き、油焚き）

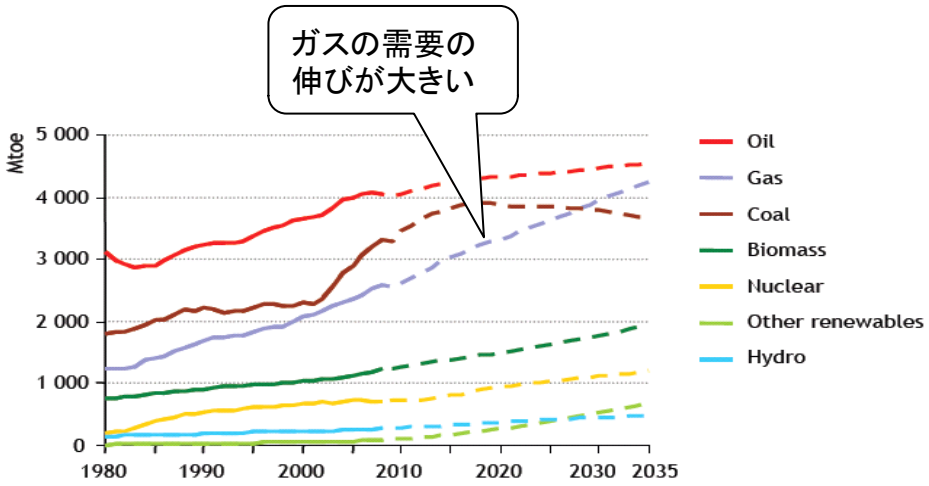


図４－１　世界エネルギー需要予測（出典：IEA World Energy Outlook (2011)）

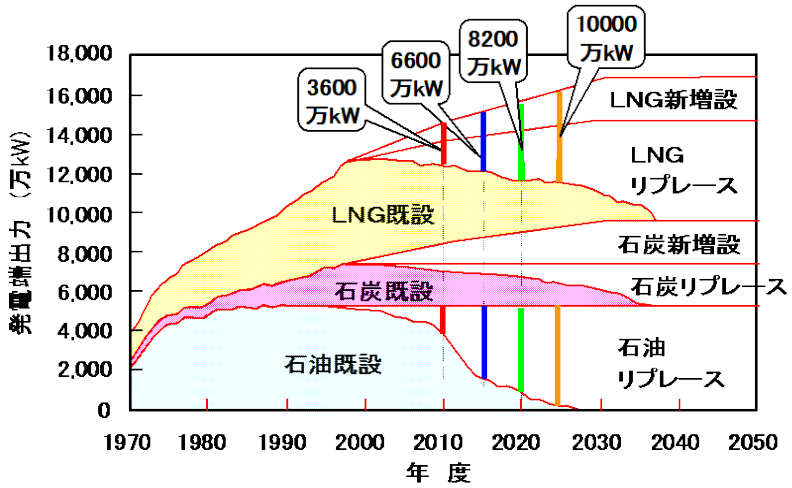


図４－２　日本における電源構成の推移推定例（寿命 40 年）
（出典：電力中央研究所「第 18 回ｴﾈﾙｷﾞｰ未来ﾌｫｰﾗﾑ」(1999)）

また、世界全体のガスタービン発電市場は国内発電市場の 10 倍以上の規模があり、世界に先駆け、中容量の高効率発電システムが日本で実用化できれば海

外展開として市場が開ける。100MW 級以下の高効率中小容量発電システムは送電網系統のインフラ整備が不充分な地域、特にエネルギー需要が急増している中国等アジア地域において、分散電源として地域の電源供給に貢献できる。また、分散電源としての海外への市場展開を図ることにより、外貨獲得および国内産業への波及効果が期待できる。

表４-２に、AHAT のセールスポイントとユーザーのメリットを示す。

効率は中小容量クラスでは GTCC と同等以上であるが、このクラスのガスタービンは、欧米メーカーが技術的に先行し、販売シェアを占めている。そこで、独自の高湿分空気利用によるセールスポイントを付加して、事業化する戦略とする。

（運用性）

蒸気タービンがなくコンバインドサイクルに比べて高いフレキシビリティ(起動速度、負荷変化速度)が期待できる。特にコールド起動時間(ガスタービンや蒸気タービン、プラント機器が常温状態からの起動時間)は、排熱回収ボイラと蒸気タービンの暖機が不要のため、GTCC よりも高速な 60 分を目標としている。

（環境性）

高湿分燃焼によって燃焼温度分布の均一化が可能であり、低 NO x 化が可能である。プラントの排熱において高温側と低温側の温度差を約２倍取れるため、空冷式とした場合でもコンバインドサイクルの場合の約半分の伝熱面積とすることを目標としている。空冷式の採用により、冷却水が利用できない内陸部への立地が容易となり、温排水の制約も緩和できる。

（経済性）

蒸気タービンがないことから機器構成がシンプルで設置工事の工期が短くて済み、建設費を低減できる。発電コストは、建設費などのイニシャルコストと、主に燃料費に依存するランニングコストで決まる。本システムが、建設費および発電効率においてコンバインドサイクルと同等以上の優位性を示せば、ライフサイクルコストにおいても従来システム以上の優位性を示すことができる。図４-３に、発電端出力 160MW の場合の AHAT の配置検討結果例を示す。単位出力当たりの敷地面積は約 $50m^2$/MW となり、従来のコンバインドサイクルの約 $60〜90m^2$/MW(日立製作所、100MW 級コンバインドサイクル実績)よりも小さな敷地面積で立地可能である。また、水回収により、補給水ゼロも可能となり、水資源が希少な地域で経済性メリットが大きい。

表４-２　AHAT のセールスポイントとユーザーのメリット

比較項目		AHAT（目標）		GTCC(ガスタービンコンバインドサイクル)	顧客ターゲットとメリット
効率	発電効率	○	200MW以下の同出力レベルでGTCCと同等以上	ベース	・日本、欧米：CO2削減による環境保全 ・アジア、欧州：ランニングコスト低減による経済性向上
運用性	起動時間	◎	ホット起動：30分 コールド起動：60分 （蒸気タービン無）	ホット起動：60分 コールド起動：180分 （蒸気タービンの暖機必要）	全地域：再生可能エネルギーとの連携（負荷変動への対応）
	負荷変化率（時間あたりの出力の変化率）	◎	ガスタービン単独の場合と同等 （10%/min程度）	蒸気タービンの負荷変化率に依存 （5%/min程度）	
環境性	NOx（窒素酸化物）排出濃度	○	脱硝装置無しで10ppm以下 （高湿分燃焼）	脱硝装置必須	日本、欧米：低NOx排出による環境保全
	立地の自由度	◎	水回収装置の空冷化が比較的容易、内陸部にも設置可能 伝熱面積：50%	蒸気タービンの復水器の空冷化は伝熱面積大きく、臨海立地向き 伝熱面積：100%	・日本：自治体、事業者向けリスク回避型分散電源(内陸立地) ・中東、アフリカ、欧米：内陸部、グリッド未整備地域へ中小容量分散電源
経済性	機器コスト	◎	蒸気タービン系無しのため、GTCC以下	ベース	全地域：イニシャルおよびランニングコスト抑制による経済性(ライフサイクルコスト)最小化
	建設期間	○	蒸気タービン系無しのためGTCCより短工期	ベース	
	水消費	○	水回収により、補給水ゼロも可能	排熱回収ボイラのブロー水の補給	渇水地域：高効率発電プラントを導入により、環境保全、経済性向上

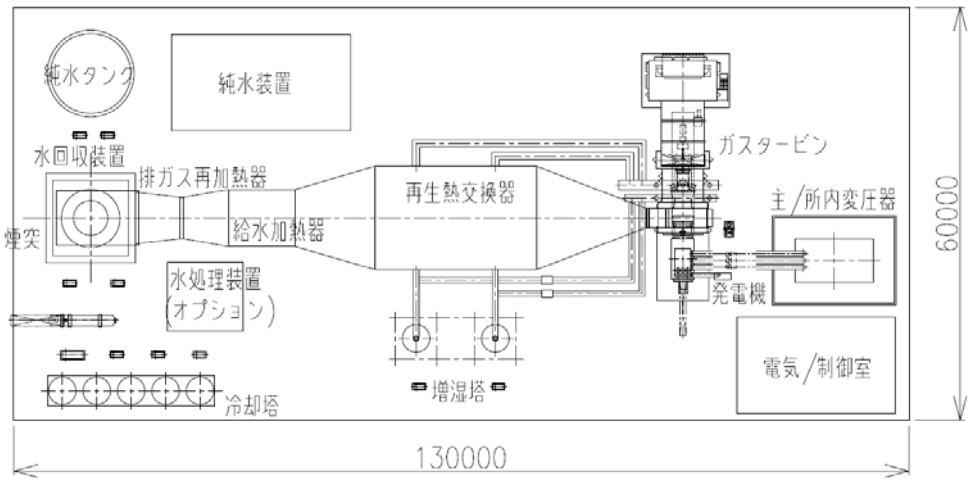


図４-３　発電端出力 160MW の AHAT の配置検討結果例

次に、2010 年に運開した出力 50MW～200MW の中小容量ガスタービンの立地点に関し、地域別に臨海部か内陸部か分類した結果を図４-４に示す。同図によると、海に囲まれている我が国と異なり、世界全体でも内陸立地の割合は大きく、特に中東、アフリカの内陸立地の割合は大きい。発電効率がコンバインドサイクルと同等以上に高く、内陸立地も容易な AHAT システムが実用化されれば、これらの地域に導入できると考える。

ターゲット市場と戦略を、地域別に整理して表４-３に示す。同表に記載した主な戦略をまとめると、以下となる。

(a) 国内は、従来からターゲットとしてきた LNG 火力リプレース、石油火力の燃料転換にも対応したリプレース市場だけでなく、エネルギーセキュリティー確保を目的とした自治体、発電事業者を新たなターゲットとする。

(b) 海外では、欧米など再生可能エネルギーの導入が多い地域の他、立地の自由度のメリットを生かし、中東、西アジア、アフリカ等の内陸部、グリッド未整備地域を中心にシェア拡大化を狙う。これらの国に導入することで、我が国には資源権益確保が可能となり、双方にメリットが生じる。

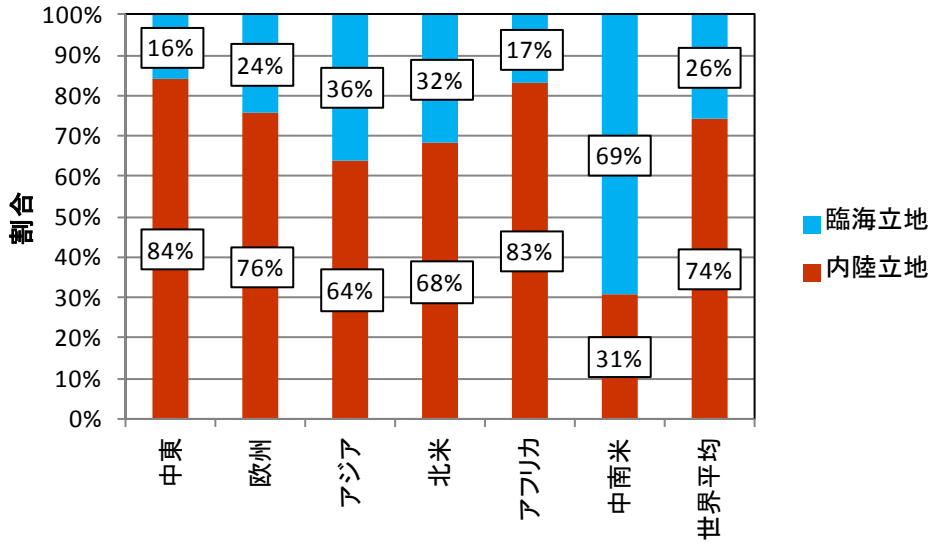


図４-４　地域別立地点の割合(2010年運開分)(出典：日立調査結果)

表４-３　ターゲット市場と戦略

No.	市場	特徴	戦略
1	国内	・再生可能エネルギーとの連携ニーズ大 ・震災以降、エネルギーセキュリティー確保を目的とした分散電源のニーズ	・LNG火力リプレース、石油火力の燃料転換などのリプレース市場のユーザーに提案する ・内陸立地の分散電源の案件を狙う
2	欧米	再生可能エネルギーとの連携ニーズ大	起動時間、負荷変化率のメリット生かし再生可能エネルギーとの連携向けを狙う
3	中国、 東南アジア	・中国の内陸部の発展 ・高気温	・内陸立地の分散電源の案件を狙う ・高気温地域に、出力低下が少ない点をアピールする
4	中東、 西アジア、 アフリカ	・高気温 ・水が乏しい ・グリッド未整備地域多い	・高気温地域に、出力低下が少ない点をアピールする ・水が乏しい地域に、補給水が少ないまたは不要な点をアピールする ・グリッド未整備の内陸立地の分散電源の案件を狙う

４－２　波及効果

高湿分空気利用ガスタービン技術は下記次世代システムの基盤技術になり、開発を推進していくことは重要である。

・　ＩＧＣＣと高湿分空気利用ガスタービン技術の融合

石炭ガス化複合発電ＩＧＣＣと高湿分空気利用ガスタービン技術を組み合わせたＩＧＨＡＴが提案されている。ＩＧＨＡＴは石炭ガス製造時の排熱を水蒸気としてガスタービンに取り込むことができるためＩＧＣＣよりも効率が高く、単位出力あたりの設備コストも安くなると評価されている。

ＣＯ２をガス化剤とする酸素吹きガス化炉とクローズドサイクルＡＨＡＴを組合せることでＡＨＡＴの作動流体はＣＯ２と水蒸気が主成分となり、水回収装置で水を除去すれば、ＣＯ２分離動力を必要とすることなく低温度のＣＯ２を回収することができ、高効率ＣＯ２回収システムが実現できる。また、ガス化ガスの代わりに天然ガスとすることでＣＯ２回収型クローズドＡＨＡＴを実現できる。

・水素燃焼ガスタービン

水素は高い燃焼温度が得られ、燃焼生成物は水蒸気である。水素燃焼ガスタービンの実現には超高温ガスタービンの技術とともに、高湿分空気利用ガスタービン技術も有効な基盤技術となることが期待される。

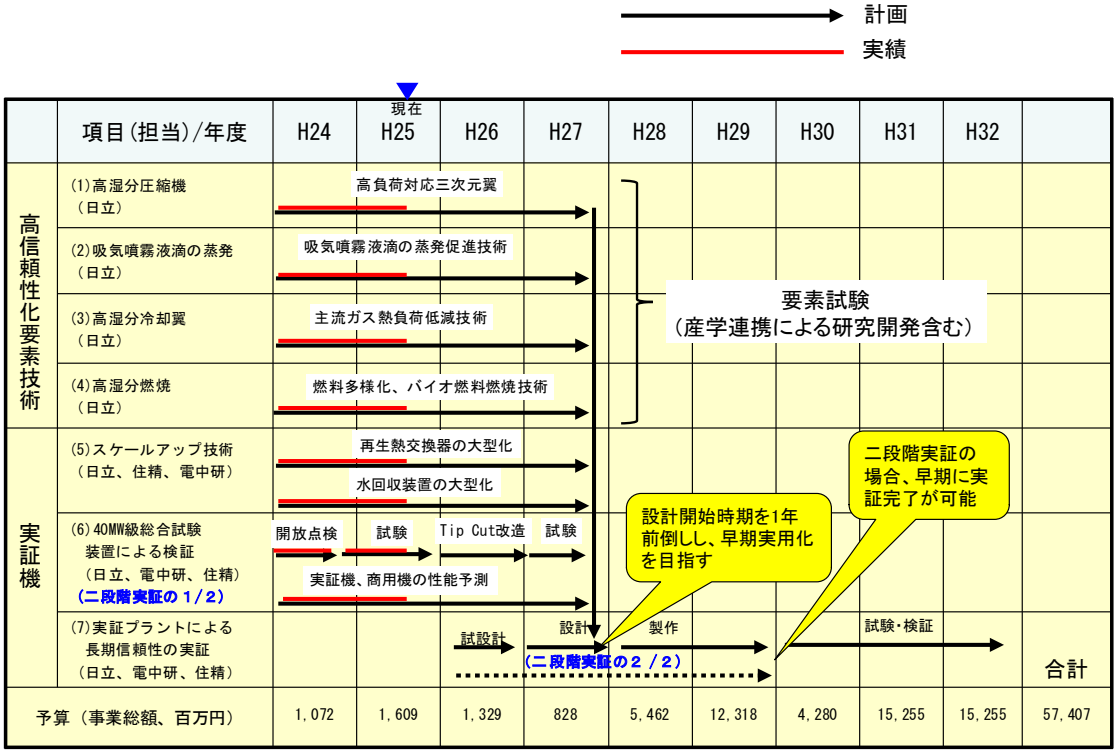
以上示したように、ＡＨＡＴシステムは極めて重要な技術開発といえる。

５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

５－１　研究開発計画

表５-１に、各実施項目の工程に関し、計画と実績を示す。AHAT の信頼性を確保する高信頼性化要素技術の開発は、順調に進められている。AHAT システムの長期信頼性実証のための実証機は、平成 26 年度から試設計を開始する計画であり、事業経費の低減と実証の早期完了、早期実用化の観点から、AHAT の構成要素を二段階に分けて実証する二段階実証を検討中である。

表５-１　ＡＨＡＴの研究開発計画



５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

円滑な推進と最大限の成果を達成するため、図５-１に示す 3 事業者で分担し開発を推進している。ガスタービンシステム及び全体取りまとめを日立製作所が担当し、新型システムの実用化にあたって重要な、電力等のユーザーの視点に基づくシステム評価を電力中央研究所が担当、再生熱交換器のスケールアップ技術は、高温熱交換器の専門メーカーである住友精密工業が担当している。40MW 級総合試験は 3 事業者が協力して実施し、研究の加速と事業の適正な推進を図っている。

国内の４つの大学(東京大学、東京工業大学、岩手大学、東北大学)との共同研究により、大学が有する最新の理論、技術、設備を活用し、本開発の加速を図っている。①高湿分圧縮機の圧縮機翼の非定常現象解明には東京大学、②蒸発促進技術の吸気噴霧液滴の蒸発促進には東京工業大学、③高湿分冷却翼の、冷却翼の空力・伝熱に関する要素技術には岩手大学、④湿分燃焼器の燃焼解析による燃焼器内の現象評価には東北大学が参画している。これらの大学との共同研究は、本事業の開発加速だけでなく、国内の大学の研究水準向上にも寄与している。

○　プロジェクトリーダー：　（株）日立製作所　圓島　信也

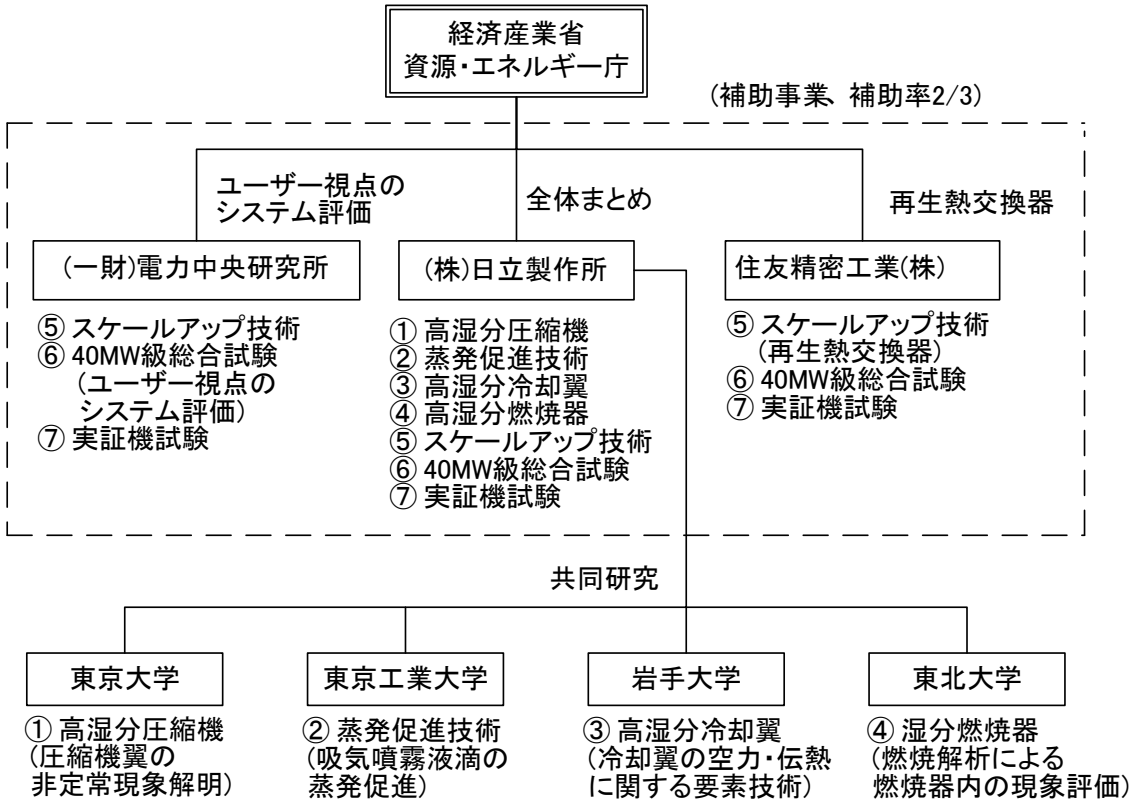


図５-１　ＡＨＡＴ研究開発体制

５－３　資金配分

高信頼性にむけた要素技術開発、40MW 級総合試験、実証機による長期信頼性試験の各段階において適切に資金を配分し、事業の円滑な推進に努めている。長期信頼性を確認する実証機の設計、製作、運転に、全体の約９２%の配分を計画している。

表５-２　資金の年度配分（事業費ベース）

（単位：百万円）

実施テーマ＼年度	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32	合計
①高湿分圧縮機	93	429	167	50						739
②吸気噴霧液滴の蒸発	40	48	56	50						193
③高湿分冷却翼	62	78	159	80						379
④高湿分燃焼	150	285	195	48						678
⑤スケールアップ技術	166	183	343	100						892
⑥40MW級総合試験	563	586	410	400						1,959
⑦実証機による長期信頼性				100	5,462	12,318	4,280	15,255	15,255	52,569
合計	1,072	1,609	1,329	828	5,462	12,318	4,280	15,255	15,255	57,407

５－４　費用対効果

本事業には、９年間で３８３億円の補助金が投じられる予定であり、いままでにAHATシステムの有効性を確認しシステムの成立性の目処をつけるなどの成果をあげてきている。

ＡＨＡＴシステムは世界初の高湿分再生型ガスタービンシステムとして国内外の学会では高い関心を寄せられており、2008年日本ガスタービン学会から技術賞を受賞した。2009年米国機械学会ASME Turbo EXPOのCycle Innovation 部門からBest Paper Awardを受賞し、さらに2010年米国機械学会ASME Turbo EXPOでは、全部門の中から唯一与えられるJ.P. Davis賞を受賞した。これらを含め、海外４回、国内２回の表彰を受けている。

（ＣＯ２削減効果）

天然ガス火力発電設備のＣＯ２排出量は、発電効率に反比例する。効率が低い発電設備をAHATに更新することにより、CO2排出が削減できる。

	燃料	送電端効率 (%HHV)	CO2 排出量
中容量 AHAT	LNG	51	－12%
既存中容量 CC	LNG	45	ベース

５－５　変化への対応

燃料価格の高騰、電力の安定供給を背景に燃料多様化へのニーズが拡大しており、ピーク運用に関し、燃料をＬＮＧだけでなく油まで対象を拡大し、油焚きＡＨＡＴシステムを開発しておくことが有効である。

太陽光発電の大量導入計画により、火力発電には運用性の見直しがもとめられてきており、運用性に優れたＡＨＡＴは調整用電源として有効である。

さらに火力発電にはＣＯ２排出抑制が強く求められており、ＣＣＳ Ready の要求が将来的には広がってくると予想される。ＡＨＡＴはクローズドサイクルにすることで CO２分離動力なしに高効率に CO２を回収できる特長を備えている。

Ｃ．先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発事業

１　事業の目的・政策的位置付け

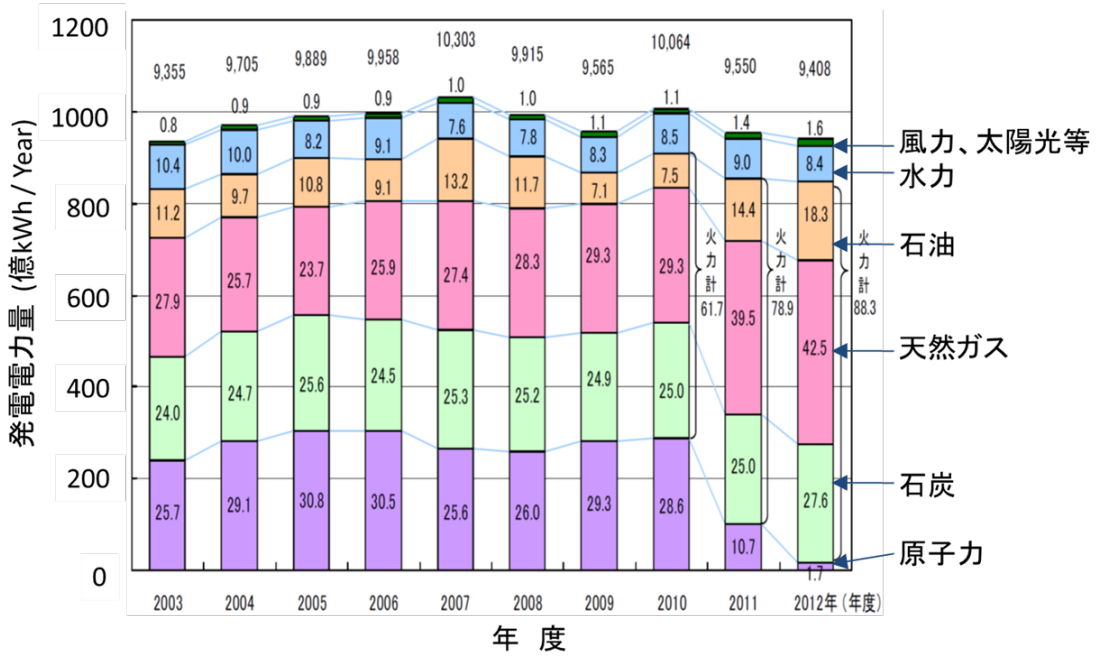
１－１　事業目的

我が国のエネルギーセキュリティ確保のためには、長期的な視点に立った化石燃料資源の有効利用が重要課題の一つである。特に近年アジア地域で急速に経済発展が進み、その影響によりエネルギー源の多様化は必須の状況である。その埋蔵量や他の化石燃料（天然ガス等）への価格牽制等を勘案すれば、石炭はエネルギー源のベストミックスを追求する上で、重要な位置付けにあると考えられる。国内の電源構成では図 1-1 に示すように東日本大震災以後、原子力が減少し、石油、天然ガス、石炭のシェアが増大した。石油、天然ガスは比較的高価な燃料であり、現在の我が国の貿易収支を悪化させる要因となっている。石炭の価格は安価で安定している。しかしながら、石炭は二酸化炭素 排出量が多いため、可能な限り効率良く、クリーンに利用できる技術の開発が強く求められている。

また、1970 年代のオイルショック以降に大型石炭火力が建設されてきたが、初期のものは更新や大幅な改修の時期に迫りつつある。そのような需要に対して、有効な技術の開発が必要である。

本事業で研究開発する先進超々臨界圧火力発電（以下「A-USC」）はこのような必要性に応える石炭火力発電技術であり、現在最新の石炭火力よりも二酸化排出量の 10~15%削減が期待できる。また、A-USC は従来石炭火力と同じシステム構成を有しているので、A-USC の技術を用いれば、既存石炭火力発電所を経済的に更新または大幅な改修を行うことが可能になる。

本事業では従来 630℃程度が限界といわれていた蒸気温度を 700℃まで向上し、2020 年代に商用プラントでの高位発熱量基準送電端効率 46%達成の見通しを得ることを目的として本技術開発を行うものである。



Source: http://www.fepc.or.jp/about_us/pr/sonota/__icsFiles/afieldfile/2013/05/17/kouseihi_2012.pdf

図 1-1　一次エネルギー源毎の国内発電量

１－２　政策的位置付け

・「京都議定書目標達成計画」（平成 17 年 4 月閣議決定）において、エネルギー転換部門の取組において、「電力分野の二酸化炭素排出原単位の低減」として、発電部門における二酸化炭素排出量原単位を低減させることが重要であることから、火力発電の熱効率の更なる向上の対策を講ずるとされている。

・「第 3 期科学技術基本計画」（平成 18 年 3 月閣議決定）の分野別推進戦略において、化石燃料の開発・利用の促進における重要な研究開発課題、「クリーン石炭利用技術」に位置づけられている。また、「平成 22 年度の科学技術に関する予算等の資源配分の方針」（平成 21 年 6 月）において、低炭素社会実現に必要な「最重要政策課題」に位置づけられている。

・「新・国家エネルギー戦略」（平成 18 年 5 月）において、総合資源戦略確保の具体的取組として、「化石エネルギーのクリーンな利用の開拓」が位置づけられている

・「低炭素社会づくり行動計画」（平成 20 年 7 月閣議決定）において、ロードマップの着実な実行が掲げられている「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」及び「環境エネルギー技術革新計画」の双方に位置づけられている、高効率石炭火力発電の技術開発。（図 1-2）

・「エネルギー基本計画」（平成 22 年 6 月改定）において、我が国が有する世界最高水準の石炭火力発電技術をさらに革新していくことが重要であり、IGCC・A-USC（先進的超々臨界圧発電）等について、更なる高効率化や早期の実用化を目指して、官民協力して開発・実証を推進するとされている。さらに、高効率の石炭火力技術については、我が国を環境に優しい石炭火力の最新鋭技術の実証の場として位置づけ国内での運転実績の蓄積を図るとしている。

・「日本再興戦略」（平成 25 年 6 月）において「二．戦略市場創造プラン」「テーマ２：クリーン・経済的なエネルギー需給の実現」「〇火力発電の技術開発支援」の中で、「先進超々臨界圧火力発電（A-USC）について 2020 年代の実用化を目指す（発電効率：現状 39%程度→改善後 46%程度）。」と位置付けられている。

・総合科学技術会議「環境エネルギー技術革新計画」（平成２５年９月）において、生産・供給分野の主要技術として高効率石炭火力発電のさらなる高度化が掲げられている。

図 1-2　Cool Earth-エネルギー革新技術計画

出典：「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」（概要）　平成２０年３月５日　経済産業省

図 1-3　日本再興戦略における位置づけ

出典：首相官邸ウェブサイト　http://www.kantei.go.jp/jp/headline/seicho_senryaku2013.html

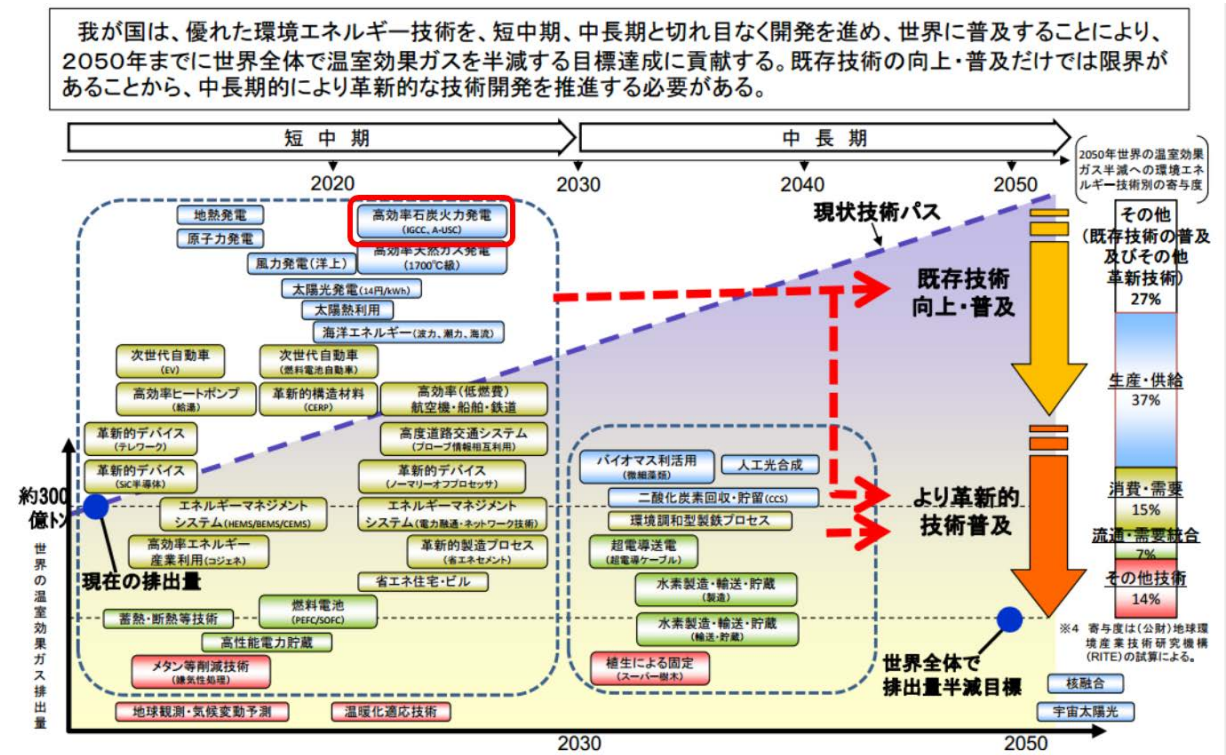


図 1-4　環境エネルギー技術革新計画における位置づけ

出典：総合科学技術会議　環境エネルギー技術革新計画（改訂案）【概要】　平成２５年９月１３日

１－３　国の関与の必要性

本研究開発は、我が国の長期のエネルギーセキュリティー確保と環境保全問題という命題を解決する技術開発であり、その成果は国民全体に裨益する。特に現有石炭火力の二酸化炭素排出削減に効果的である本技術は、国民生活への寄与が高い。

しかし、効率的な事業経営によるコスト低減という社会的要請のなか、開発リードタイムと技術開発負荷を鑑みると、民間のみの開発では継続的な投資は困難である。国の後押しとしての資金負担がなければ実施され得ないと考えられる。このため、一定程度の国庫補助は不可欠といえる。

一方、欧米においては EU や国家の支援の下、既に国際、国家レベルでのプロジェクトによる開発が進行中であり、中国、インドにおいても国家資金による開発が進められている。放置すると世界をリードして来た我が国の USC 技術が陵駕されるのも時間の問題である。我が国の産業競争力の維持、強化、ものづくり力の強化の観点からも最先端の A-USC 技術の発展を図ることが重要である。さらに、A-USC 技術が確立されれば東南アジアを始めとする石炭依存度の高い地域への展開等我国のエネルギー戦略上有効な国際協力活動の手段としての位置づけも可能と考えられる。以上のことから、我が国の国益のため国として一定の支援を行うことが適当と考えられる。

A-USC のシステムを完成するにはボイラメーカ、タービンメーカ、弁メーカ、材料メーカ等関与する企業が多岐に及ぶ。どの企業にとってもリソース（人的、資金的）を 10 年以上に及ぶ長期的な開発にあてるには、たいへん大きな決断を伴う。また、長期的な開発故に、その間の社会状況の変化等による技術開発の意義づけが変化するといったリスクも伴う。本事業は単なる事業促進補助ではなく、上述のような大きなリスクを伴う技術開発への補助であることを鑑みると補助率は 2/3 が妥当であると考えられる。

さらに、国際的に見ると中国、インドは丸々国からの資金で技術開発を行っている。そのような面からみても補助率は 2/3 が妥当であると考えられる。

２　研究開発目標

２－１　研究開発目標

従来の石炭火力発電では蒸気タービン入口の蒸気温度が 600℃程度で、高位発熱量基準送電端熱効率は 42%だった。A-USC では蒸気温度を 700℃まで高めることにより、2020 年以降において商用プラントでの高位発熱量基準送電端熱効率 46%達成の見通しを得ることを本研究開発の最終的な目標とする。（図 2-1）

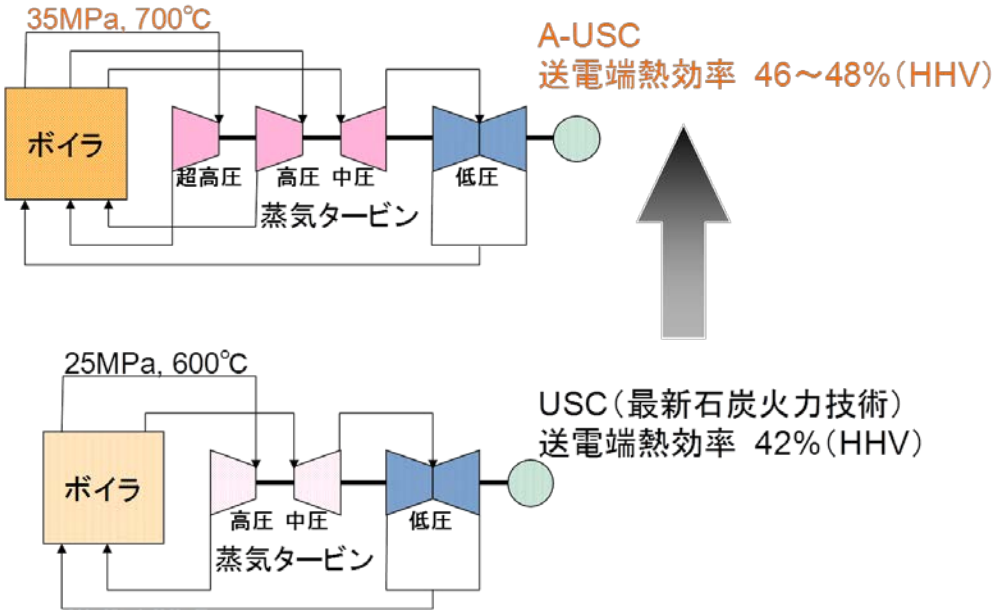


図 2-1　A-USC 開発目標

目標を達成するためにはボイラ、蒸気タービンに開発課題がある。

図 2-2 に A-USC システムと各部の候補材料を示す。ボイラでは石炭を火炉で燃焼し、その熱を使って 700℃の主蒸気、720℃の再熱蒸気を発生する。蒸気は蒸気タービンへ導かれそこで膨張し、仕事をする。図中、ピンクの塗りつぶしで示した部材は 700℃以上の温度になる。このような高温では従来の鉄鋼材料では強度が不足するため、Ni 基合金の適用が考えられている。Ni 基合金はこれまでガスタービンの高温部材として使われてきたが、重量はディスク材の 2～3 トン程度が最大だった。ボイラや蒸気タービンでは数十トンから数百トンクラスの部材があり、Ni 基の従来実績をはるかに上回る大きさとなる。さらに、石炭火力発電の大型部材は数十年の寿命が要求され、700℃以上の温度で連続的に長期間使用しても強度の低下や酸化、腐食等の問題が生じない Ni 基合金を開発する必要がある。また、Ni 基合金は従来の鉄鋼よりも高価であることから、従来よりも耐熱温度が高い鉄鋼材料を開発し、Ni 合金の適用部位を極力抑制する必要がある。なお、本図において、「未実績材料」とはすでに他の機械システム、

例えばガスタービン等に用いられている材料であり、まだ USC、A-USC では使用実績の無い材料のことである。「開発材料」とは A-USC に適用するために新たに開発、検証する材料のことである。

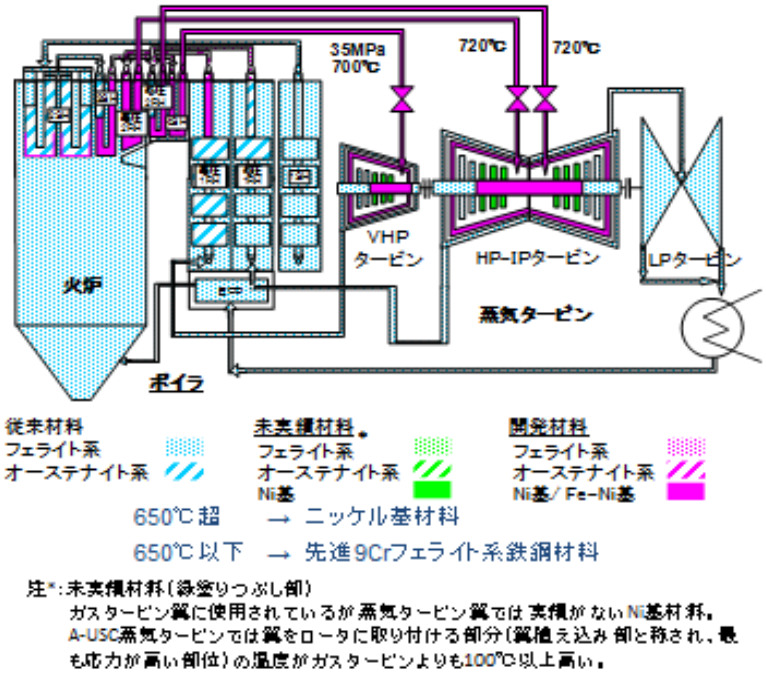


図 2-2　A-USC システムと候補材料

２－１－１　全体の目標設定

A-USC の実用化への道筋を図 2-3 に示す。この中で本研究開発は要素技術開発として位置づけられ、実証機検証に向けた要素技術の確立を目指す。

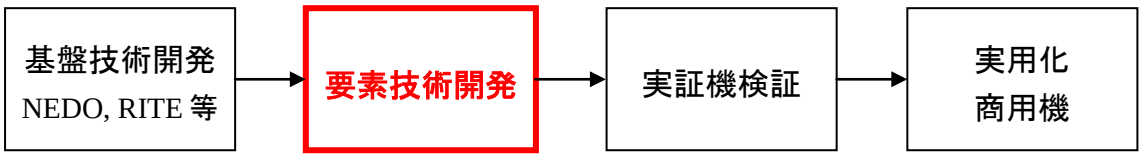


図 2-3　A-USC 実用化への道筋

本研究開発のマススケジュールを図2-4に示す。技術開発項目としては(1)システム設計、設計技術開発、(2)ボイラ要素技術開発、(3)タービン要素技術開発、(4) 高温弁要素技術開発、(5) 実缶試験・回転試験（高温弁を含む）からなる。9 年間の事業期間中、主として前半の 5 年間で第(1)～(4)項の開発を行い、主として後半の 4 年間で第(5)項の開発を行う。高温長期材料試験は 9 年間を通して実施する。

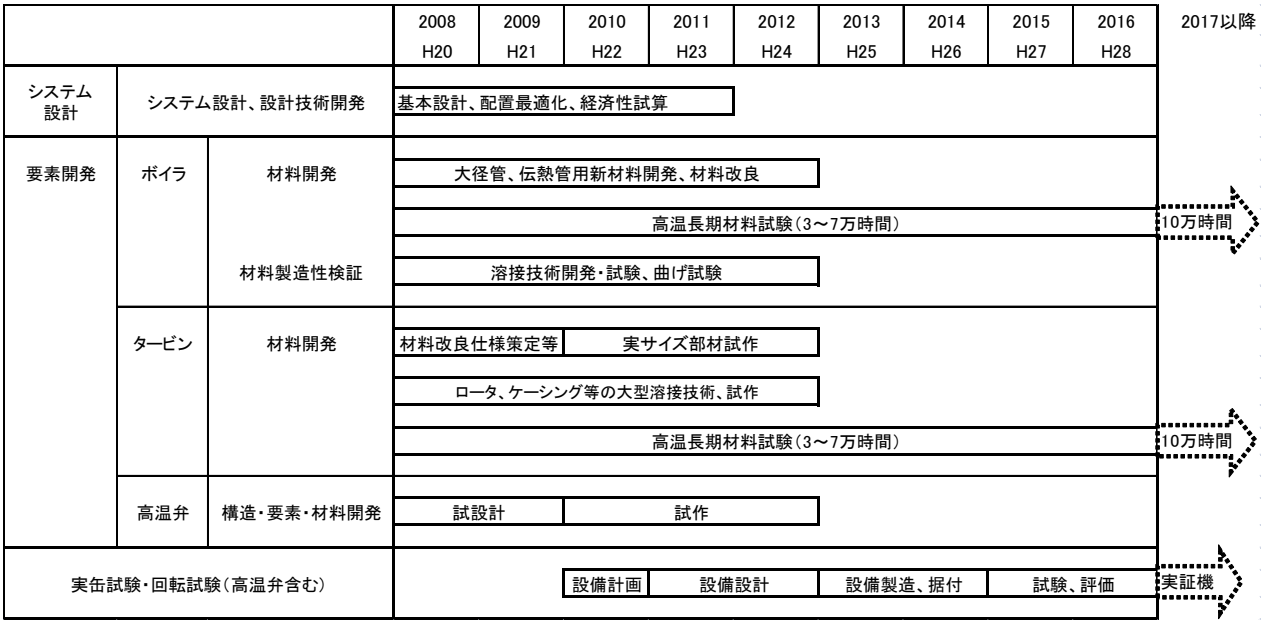


図 2-4　マススケジュール

中間評価時点では 3 万時間程度の材料試験結果が得られているで、この結果を外挿し長時間信頼性を推定する。さらに、システム設計により熱効率 46%を確認することを中間評価時点での目標としている。

表 2-1-1 に実証機検証に至るまでの目標を示す。

表 2-1-1　全体の目標

目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
高位発熱量基準送電端熱効率 46%以上を達成できる A-USC の要素技術確立	①熱効率 46%達成可能性確認を含め、システム設計を完了する。	①早期にシステム設計を実施し商用プラントの成立性を確認する。
	②ボイラ、タービン高温弁の材料開発、製造性検証を完了する。	②プロジェクト後半に実施する実缶試験・回転試験による要素技術の総合的な検証に向け、材料開発、製造性検証を完了しておく必要がある。
	③中間評価時点では一部の材料では 3 万時間を超える高温長期材料試験結果が得られているので、これらの結果を 10 万時間まで外挿し長期信頼性を推定する。	③10 万時間の材料強度を推定するには 3 万時間程度の長時間材料試験等による検証が欠かせない。
	④実缶試験・回転試験設備の基本設計を完了する。	④2015~2016 年度に実施する実缶試験・回転試験に向けこの時点で基本設計を完了する必要がある。

２－１－２　個別要素技術の目標設定

システム設計については熱効率 46%以上を確認し、経済性を含めた商用プラントの成立性を確認することが最終目標である。

ボイラ要素技術については図 2-5 に示すように、材料、保守管理、製造加工、構成機器、構造配置のそれぞれに開発、検証すべき課題がある。特に、700℃級材料の長期信頼性の検証が重要である。中間評価時点では大径管、伝熱管、電熱器モックアップ等を試作するとともに、3 万時間程度の材料試験を行い、その結果を外挿し十万時間の長期信頼性を見通している。

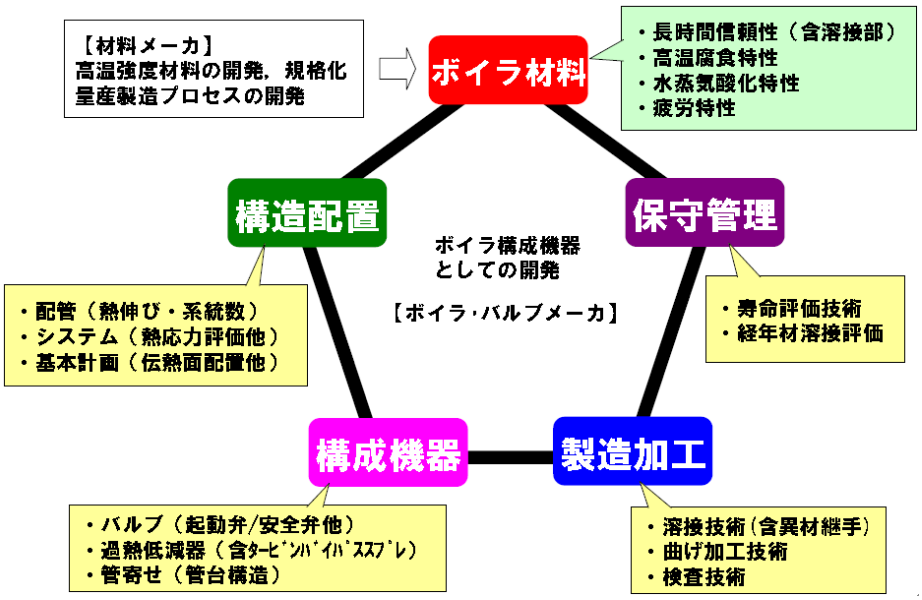


図 2-5　ボイラの開発課題

タービン要素技術については図 2-6 に示すように、材料、保守管理、製造、構造、システムのそれぞれに開発、検証すべき課題がある。特に、大型鋼塊の製造性、クリープ強度（長期信頼性）の検証が重要である。中間評価時点では中型、大型ロータ材料、中型、大型ケーシング材料等を試作するとともに、3 万時間程度の材料試験を行い、その結果を外挿し十万時間の長期信頼性を見通している。

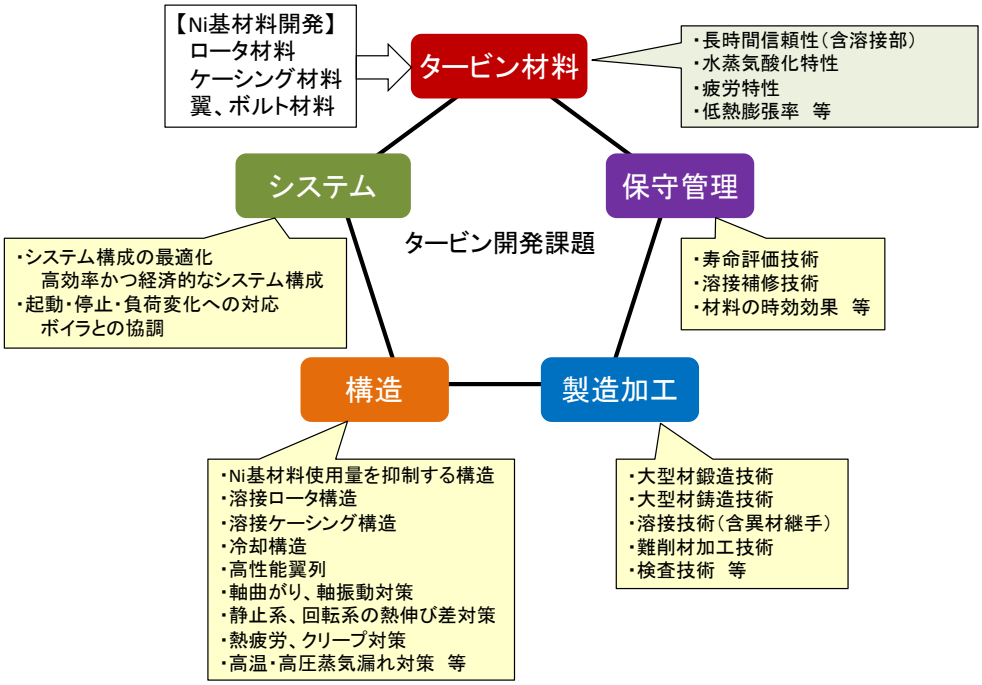


図 2-6　タービンの開発課題

高温弁要素技術については材料、保守管理、製造、構造に開発、検証すべき課題がある。弁材料としては弁棒とそれを支えるブッシュとの摺動性が課題であり、最適な組み合わせを見出すとともに、耐酸化特性検証、ケーシング試作等を中間評価時点での目標としている。

表 2-1-2　個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
システム設計、設計技術開発	・基本設計、配置最適化、経済性検討完了。	同左	商用プラントの成立性の確認
ボイラ要素技術開発	・10 万時間、750℃で 90MPa 以上のクリープ強度を持つ過熱器管材料開発 ・10 万時間、750℃で 60MPa 以上のクリープ強度を持つ加工性・	選定された候補材料で 3 万時間程度の試験からの外挿により以下目標の達成可能性を検討する。	目標達成を確認するには 3 万時間以上の長時間材料試験等による検証が欠かせない。

	経済性に優れる再熱器管材料開発 ・10 万時間、700℃で 90MPa 以上のクリープ強度を持つ厚肉大径管材料開発 ・10 万時間、650℃で 80MPa 以上のクリープ強度と継ぎ手強度低減係数 0.7 以上を持つ経済性に優れたフェライト系厚肉大径管材料開発		
タービン要素技術開発	・10 万時間、700℃で 100MPa 以上のクリープ強度を持つ鍛造大型ロータ材料開発 ・10 万時間、700℃で 80MPa 以上のクリープ強度を持つ鋳造大型ケーシング材料開発	選定された候補材料で 3 万時間程度の試験からの外挿により以下目標の達成可能性を検討する。	目標達成を確認するには 3 万時間以上の長時間材料試験等による検証が欠かせない。
高温弁要素技術開発	実缶試験・回転試験による弁信頼性の確認	摺動試験、水蒸気酸化試験、熱衝撃試験等の要素試験により材料選定作業を行い、最適な弁材料を見出す。	弁は弁棒とブッシュが 700℃環境下で摺動するので、弁動作を保証するためには摺動試験による検証が欠かせない。 同様に各種弁部品

			の 700℃での水蒸気酸化特性や熱衝撃特性を確認する必要がある。
実缶試験・回転試験	・1 万時間程度のボイラ実缶試験を実施し、700℃級ボイラ要素の信頼性を確認 ・5000 時間程度のタービン回転試験を実施し、700℃級タービン要素の信頼性を確認 ・実缶試験装置に高温弁を組み込みその信頼性を確認	試験設備の基本設計を完了する。	平成 27、28 年度に実施する実缶試験・回転試験に向け、平成 25、26 年度には設備の製作設計、製作、据付を行う。それに先立ち設備の基本設計を完了する必要がある。

３　成果、目標の達成度

３－１　成果

３－１－１　全体成果

①システム設計を完了し高位発熱量基準送電端熱効率 46%を達成可能であること、発電コストが従来の USC 並み以下であることを確認した。
②ボイラ、タービン高温弁の材料開発、製造性検証を完了した。
③3 万時間程度の材料試験により期待した材料特性が得られる見通しを得た。
④実缶試験・回転試験設備の基本設計を完了した。

３－１－２　個別要素技術成果

（１）システム設計、設計技術開発

500MW、700MW、1000MW のシステム設計を実施し、高位発熱量基準送電端熱効率 46%が得られることを確認した。

500MW システムの経済性を検討し、二酸化炭素を 10%低減しているにもかかわらず、従来の USC 並み以下の発電コストであることを確認した。

図 3-1 に 1000MW のタービン断面図を示す。

図 3-2（非公開）に USC と A-USC の累積発電コスト比較を示す。

図 3-3（非公開）に USC と A-USC の機械装置建設費比較を示す。

表 3-1-1（非公開）に累積発電コストを算出した際（2011 年 10 月）の設定値を示す。

図 3-4 に算出のベースとなった石炭 CIF 価格の推移を示す。

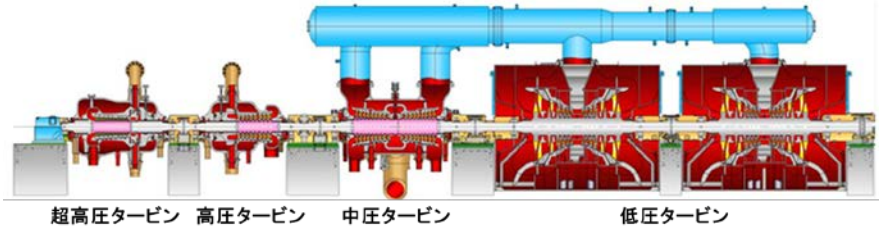


図 3-1　1000MW のタービン断面図

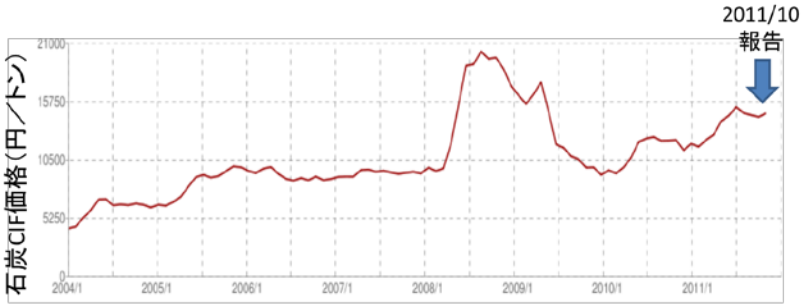


図 3-4　石炭 CIF 価格の推移（出典：財務省貿易統計）
http://toukei-is.com/h/?p=30101&f=00

（２）ボイラ要素技術開発

6 種類の Ni 基合金と 3 種類の 9Cr 鋼を試作し、3 万時間程度の短時間材料試験を実施した。この試験結果を 10 万時間まで外挿することにより、目標を達成できる見通しが得られた。今後、実際に 10 万時間まで試験を継続し、確認をする。

図 3-5 に試作した候補材料を示す。

HR6W、HR35、Alloy617、Alloy263、Alloy740、Alloy141 は Ni 基合金である。

B-9Cr、SAVE12AD、LC-9Cr は耐熱温度を向上した鉄鋼材料である。

図 3-6 には試作した Ni 基大径管と小径管を示す。材料加工特性試験を実施した結果、大径管の製造に適した材料としては HR6W、HR35、Alloy617 を選んだ。試作した大径管は曲げ試験、溶接試験等に供された。

図 3-7 には高周波加熱曲げ加工後の Ni 基大径管（Alloy617、HR6W）の例を示す。加熱温度を調整した結果、どちらも曲げ加工可能だった。

図 3-8 には Ni 基大径管と小径管(異材溶接)の溶接継手の例を示す。一部に高い溶接割れ感受性を示す材料があったが、概ね良好な溶接施工を行うことができた[注1]。

図 3-9 にはこれまで開発してきた大径管、小径管、溶接技術、管曲げ技術を総合的に検証するために製作した伝熱器ヘッダーのモックアップを示す。

図 3-5　ボイラ候補材料

図 3-6　試作した Ni 基合金製大径管と小径管

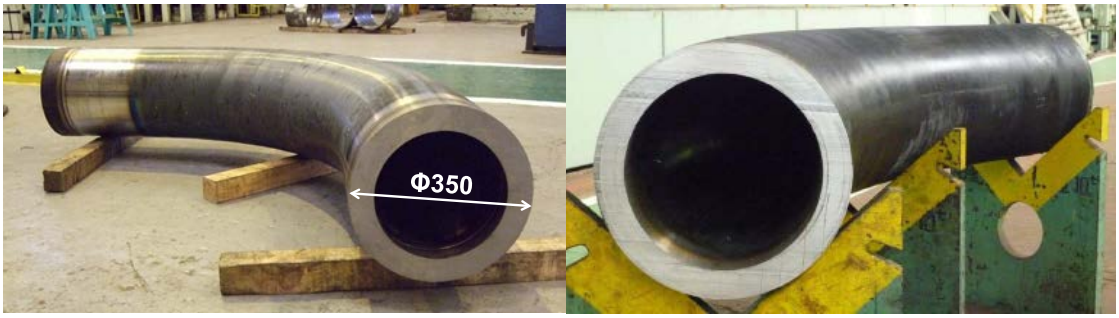


図 3-7　Alloy617 と HR6W の曲げ試験

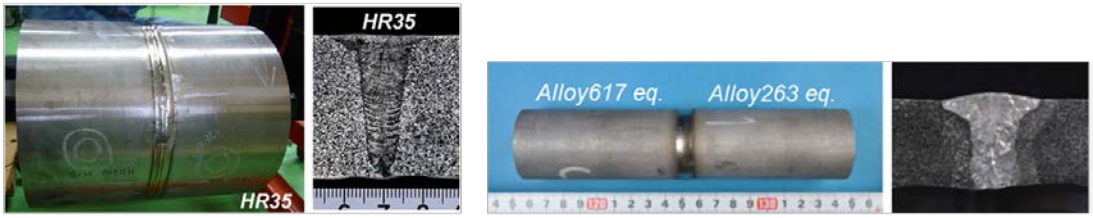


図 3-8　大径管と小径管(異材溶接)の溶接継手

図 3-9　再熱器、過熱器ヘッダーモックアップ

（３）タービン要素技術開発

3 種類の Ni 基中型、大型ロータ材料（FENIX700、LTES700R、TOS1X）と 3 種類の Ni 基中型、大型ケーシング材料（Alloy617、Alloy625、Alloy740）を試作し、3 万時間程度の材料試験を実施した。この試験結果を 10 万時間ま

で外挿することにより、目標を達成できる見通しを得た。今後、実際に 10 万時間まで試験を継続し、確認をする。

図 3-10 にはロータ試作の代表例として TOS1X の状況を示す。前回中間評価時点では 7 トンの素材の試作が可能だったが、現在では 13 トンまで製作可能である。TOS1X は Alloy617 をベースとして開発され、高い強度を得ている。

もうひとつのロータ材料の例として、LTES700R の線膨張係数を図 3-11 に示す。一般の Ni 基合金よりも低い線膨張係数になるように設計された材料であり、鉄鋼材料（2.25Cr Steel, Conventional 12Cr Steel）と同じレベルの値を有している。そのため、鉄鋼材料と溶接などにより組み合わせたときに発生する熱応力を抑えることができる。LTES700R はもともと小型のボルト用材料として開発された LTES700 を大型ロータ材料向けに改良した材料である。LTES700R の線膨張係数は LTES700 より高くなっているものの従来の Ni 基合金や 2.25Cr 鋼より低いレベルになっている。

タービンロータは一般に 30~40 トンの重量であり、一体の Ni 基合金で製作することは難しい。そのため、Ni 基合金の共材溶接、Ni 基合金と鉄鋼材料の異材溶接技術を開発した。図 3-12 にタービンロータの溶接（異材、共材）試作例を示す。

ケーシング材料については、新たな開発は行わず、既存材料の中で蒸気タービンのケーシング材に最も適した材料の選定を行うこととした。候補としては Alloy617、Alloy625、Alloy740 があり、参加各社で分担し大型鋳物を試作した（図 3-13）。当初は図左側のステップブロックを試作し、これらの材料から切り出した試験片により材料特性評価を行なった。その結果選定された材料で大型の内部ケーシング、ノズルボックスを試作した。

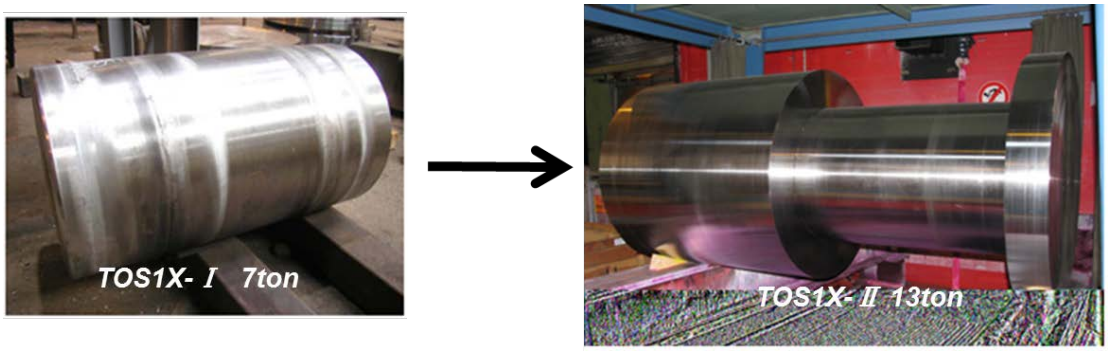


図 3-10　タービンロータ材料の大型化（TOS1X）

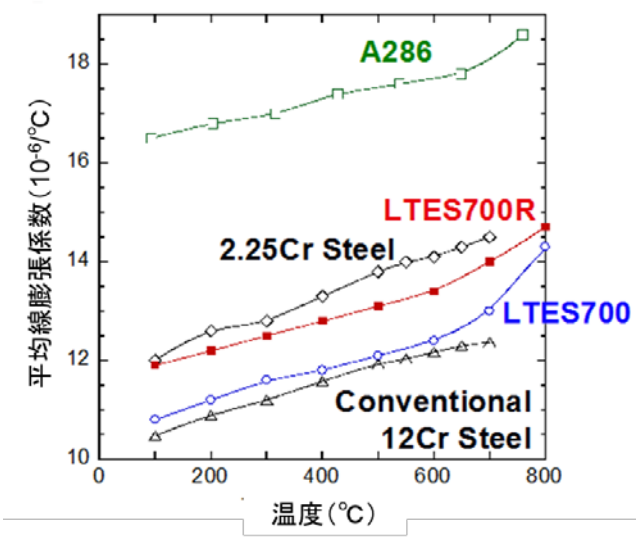


図 3-11　タービンロータ用低熱膨張合金 LTES700R

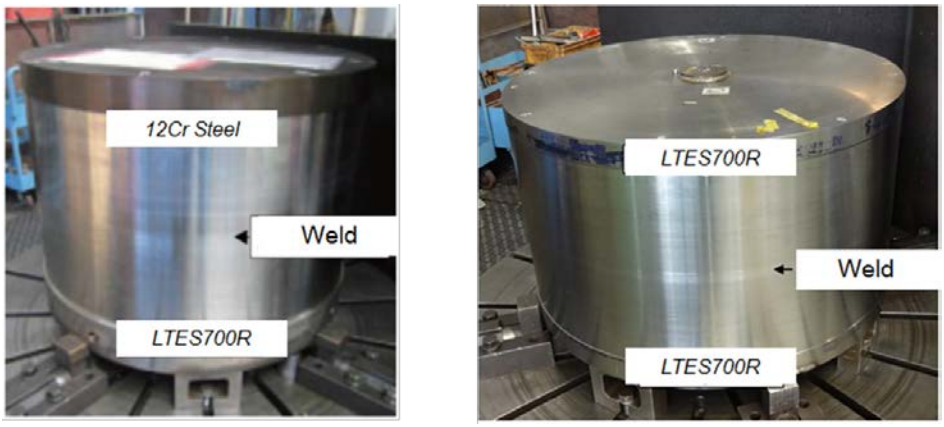


図 3-12　タービンロータの溶接（異材、共材）

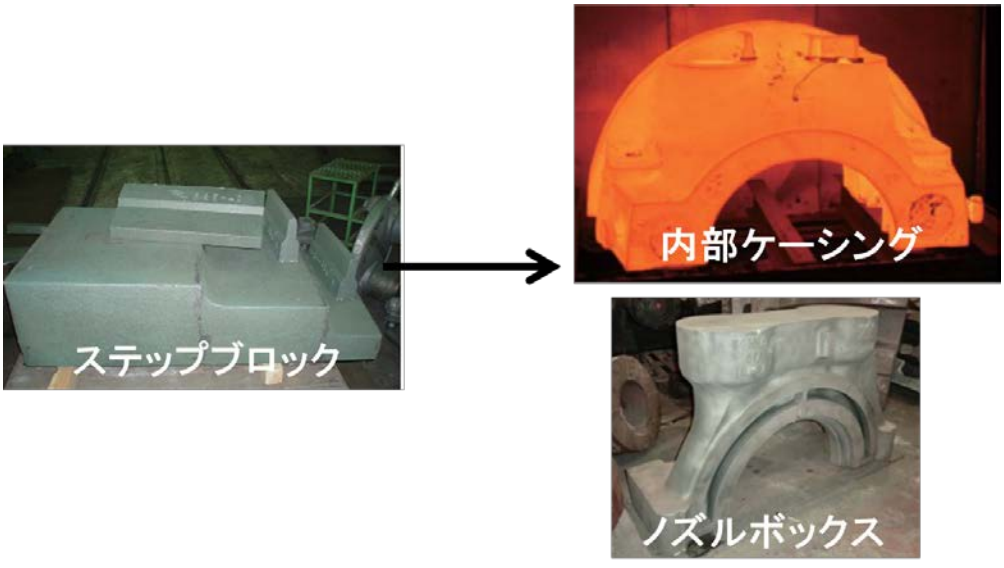


図 3-13　タービンケーシング用 Ni 基鋳物試作

（４）高温弁要素技術開発

弁材料の摺動試験、水蒸気酸化試験等を実施し、700℃条件下で使用できる材料の組合せがあることを見出した。

実機高温弁の設計を実施し、鋳造による大型弁ケーシングの製造性を確認した。図 3-14 に各種高温弁、図 3-15 に試作された 9 トンの弁ケーシングを示す。

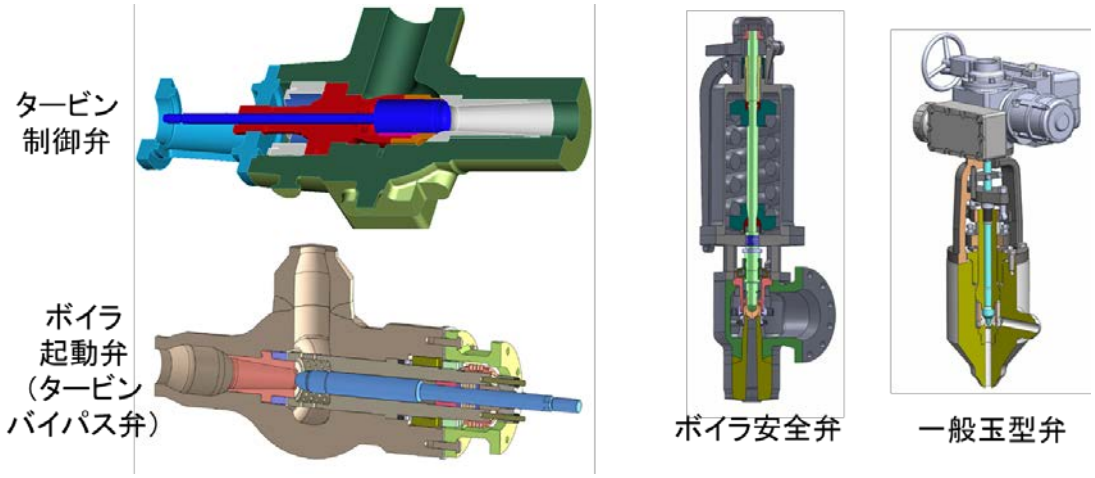


図 3-14　高温弁

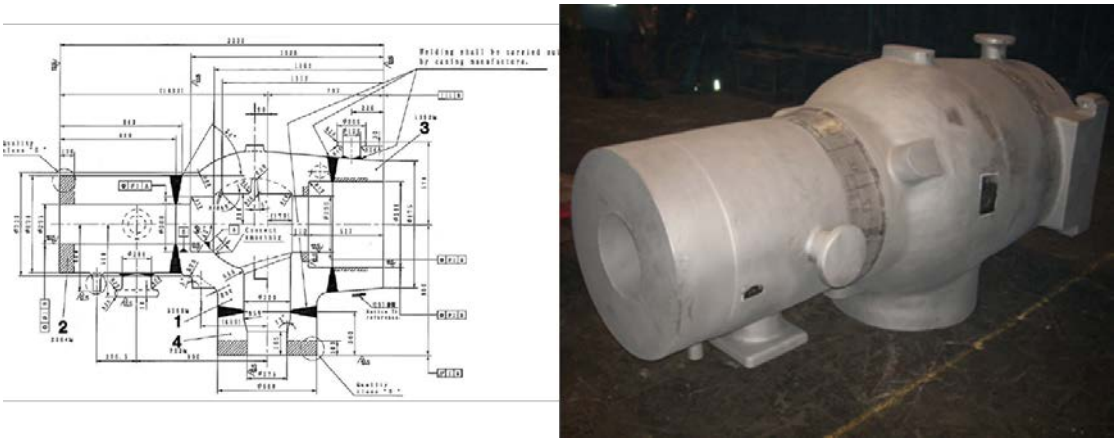


図 3-15　高温弁ケーシング(Alloy625,約 9ton)

（４）実缶試験・回転試験

実缶試験・回転試験ともに基本設計を実施、完了した。

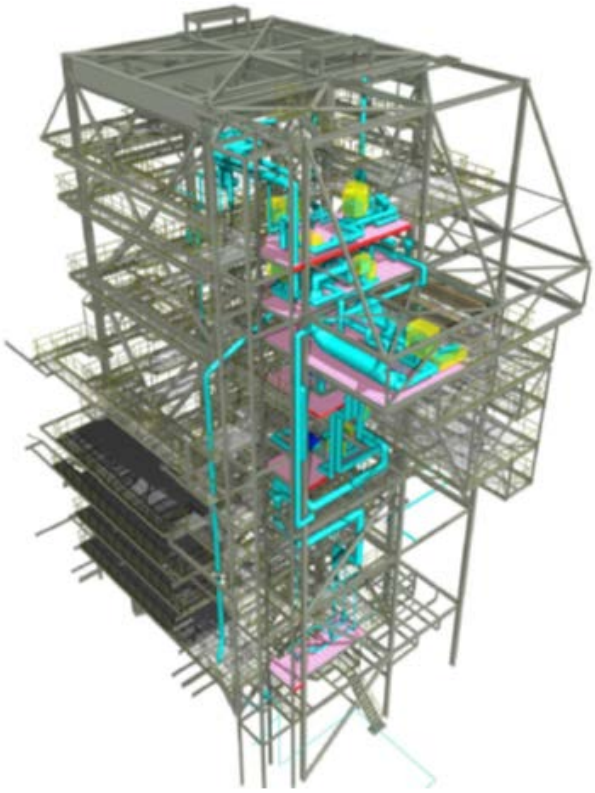


図 3-16　実缶試験装置計画図

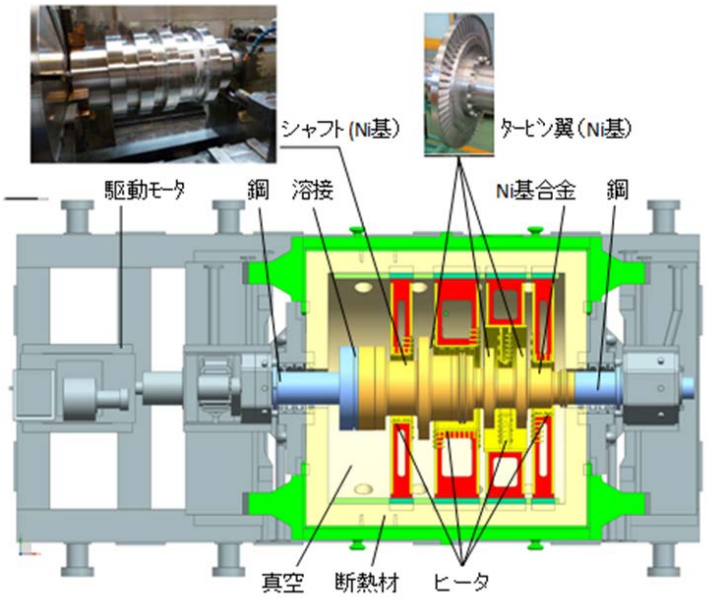


図 3-17　回転試験装置計画図

注 1：「一部に高い溶接割れ感受性を示す材料があった」
当初ボイラ候補材料である。Alloy617（大径管）を溶接したところ、下図に示すように溶接部の曲げテストにおいて溶接部に割れが生じた。この材料はクリープ強度を上げるために特別に成分調製されたものだった。溶接割れの結果を受けて、再度成分を調整し溶接試験を重ねた結果、割れを生じない材料成分を

見出すことができた。

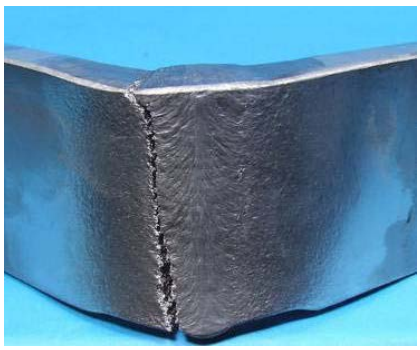


図　注 1-1　曲げ試験で見出された溶接割れ

３－１－３　論文状況等

表 3-1-2　論文、投稿、発表リスト

	題目・メディア等	時期
論文	東芝レビュー「 700℃級先進超高温蒸気タービン」	H20.9
	日本機械学会会誌「次世代超々臨界圧蒸気タービンシステム」	H20.10
	石炭利用の最新技術と展望（書籍）「クリーンコールテクノロジーの現状と将来」、シーエムシー出版	H20.12
	機械の研究「次世代超々臨界圧発電技術」、養賢堂	H20.10
	エネルギー・資源学会誌「先進超々臨界圧発電(A-USC)の開発」	H22.3
	富士時報「700℃級高温弁の要素技術開発」、富士電機	H22.5
	東芝レビュー「火力発電用蒸気タービンの高効率化技術」	H22.8
	三菱重工技報 Vol.48 No.3 (2011)「A-USC(700℃級先進超々臨界圧発電)の技術開発と展望」	H23.7
	日立評論「大容量石炭焚き火力発電設備の高効率化に向けた技術開発」	H23.8
	機械の研究「先進超々臨界圧発電技術の開発」、養賢堂	H24.1
投稿	エネルギーと動力「700℃級超々臨界圧蒸気プラント(A-USC）技術開発状況」、日本動力協会	H21 春
	日本機械学会誌「A-USC　先進超々臨界圧火力発電」	H23.4
	特殊鋼「 A-USC　先進超々臨界圧火力発電技術」	H23.11
	火力原子力発電技術協会協会誌「微粉炭焚き A-USC、および CCS」	H24.10
	ターボ機械協会協会誌「A-USC の全体構想」	H25.1
	溶接学会誌第 82 巻 6 号「次世代超々臨界圧火力発電（A-USC）材料、溶接技術開発」	H25.9
	トライボロジスト（59 巻 3 号）「次世代超々臨界圧火力発電用金属材料の動向」	H26.3
発表	日本鉄鋼協会秋季講演大会「A-USC 技術開発」	H20.9
	Cleaner Coal Workshop 2009「 A-USC Technology Development in Japan」、US Agency of International Development	H20.8
	7th COALTECH 2008「Ultra-Supercritical Coal Power	H20.11

	Generation」、APEC EXPERT GROUP ON CLEAN FOSSIL	
	第二回電力エネルギー技術シンポジウム「700℃級超々臨界圧（Ａ－ＵＳＣ）発電技術について」、東北大学大学院工学研究科付属エネルギー安全科学国際研究センター電力エネルギー未来技術（東北電力）寄付研究部門	H20.11
	高温強度部門委員会「A-USC 開発概要と蒸気タービン用材料の開発 -A-USC 開発概要-」、日本材料学会	H21.2
	3rd Symposium on Heat Resistant Steels and Alloys for High Efficiency USC Power Plants 2009「Advanced USC Technology Development in Japan」、物質･材料研究機構	H21.6
	10th International Conference on Energy for Clean Environment「IHI's activities for CO2 reduction in Boilers」	H21.7
	日本鉄鋼協会秋季講演大会 「Ni-23Cr-13Co-9Mo-1.6Al-0.1Ta-0.3Nb 合金の機械的性質に及ぼす熱処理条件の影響」	H21.9
	International Symposium on Low Carbon Technology 「ADVANCED USC TECHNOLOGY DEVELOPMENT IN JAPAN」、Chinese Society of Engineering Thermophysics (CSET)	H21.9
	Clean Coal Technology ワークショップ 2009「A-USC 技術の開発及び CCS 技術への取組み」、JCOAL	H21.8
	火原協中部支部講演会「 700℃級超々臨界圧（A-USC）プラントの開発動向について」	H21.10
	International Conference on Power Engineering (ICOPE-09)「The Status of Advanced USC Technology Development in Japan」、日本機械学会	H21.11
	日本機械学会講習会 №09-135「次世代超々臨界圧発電技術（A-USC）の開発状況」	H21.12
	第 6 回 CEE シンポジウム「 A-USC の開発状況」、東京大学エネルギー工学連携研究センター	H22.1
	国際革新的ゼロエミッション石炭火力 CCS　METI 欧州調査「 A-USC の状況および豪州酸素燃焼プロジェクトの紹介」	H22.2
	火原協関西支部講演会「低炭素化社会に向けた高効率蒸気タービンの開発動向について」	H22.3

	Sixth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants「 Coal ash corrosion properties of Ni-base alloy for Advanced-USC boiler」、EPRI	H22.8
	Sixth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants「 Advanced USC Technology Development in Japan」	H22.8
	第 57 回材料と環境討論会「700℃級 A-USC ボイラ用 Ni 基系合金の高温水蒸気酸化特性」	H22.10
	日本計画研究所「エネルギーの安定供給と地球温暖化防止の両立を実現する東芝の火力発電の高効率化と CO2 分離回収技術開発への取組み」	H22.9
	日本鉄鋼協会 ISHOC-10(Int. Sympo. on High Temperature Oxidation and Corrosion 2010 「 Development of Advanced Ultra Supercritical Plants in Japan - Materials and High Temperature Corrosion Properties -」	H22.11
	学振耐熱 123 委　耐熱金属材料の高温腐食と防食 国際シンポジウム「 Development of Advanced Ultra Supercritical Plants in Japan - Materials and High Temperature Corrosion Properties -	H22.11
	日本機械学会 第 11 回秋季技術交流フォーラム「 A-USC の取組内容と現状について」	H22.10
	日本機械学会　動力エネルギーシステム部門設立 20 周年記念国際シンポジウム「 Satisfaction of Low Carbon Society - Latest Technical Approach on Coal-fired Power Plant -	H22.11
	日本鉄鋼協会春季講演大会 「Ni-19Cr-12Co-6Mo-2Al-3Ti-1W-0.05C-0.005B 合金の組織に及ぼす熱処理の影響」	H23.3
	日本鉄鋼協会春季講演大会「A-USC ボイラ用非γ'強化型 Fe-30Cr-50Ni-W 合金の開発」	H23.3
	腐食防食協会 2011 年材料と環境研究発表会「700℃級ボイラ用 Ni 基系合金候補材の高温水蒸気酸化特性」	H23.3
	ASME Turbo Expo 2011「Development and Strategy for A-USC Steam Turbine Cycle」	H23.6
	The 4th Symposium on Heat Resistant Steels and Alloys Used for High Efficiency USC Power Plants 2011	H23.4

	「 Narrow gap HST welding process and its application to candidate Fe-Ni based alloy for 700℃ A-USC boiler components」	
	The 4th Symposium on Heat Resistant Steels and Alloys Used for High Efficiency USC Power Plants 2011「A-USC technology development project in Japan」	H23.4
	日本機械学会　動力エネルギーシンポジウム「700℃級蒸気タービン用材料の開発と機械的特性」	H23.6
	日本鉄鋼協会　第 162 回秋季講演大会「Ni-0.04C-26Cr-21Co-1Al-1.9Ti-1.8Nb 合金の機械特性に及ぼす Nb、Ti の影響」	H23.9
	日本鉄鋼協会　第 162 回秋季講演大会「γ’析出強化型 Ni 基超合金におけるσ相の析出とクリープ強度への影響」	H23.9
	International Forgemasters Meeting in autumn 2011「LARGEST STEAM TURBINE ROTOR EVER MANUFACTURED FROM A NICKEL BASE ALLOY	H23.9
	日本機械学会関西支部第 12 回秋季技術交流フォーラム「先進超々臨界圧火力発電の研究動向」	H23.10
	日本学術振興会　耐熱金属材料第 123 委員会回秋季講演大会「A-USC ロータ用 Ni 基超合金 TOS1X-Ⅱの開発」	H23.11
	NEDO 鉄鋼材料の革新的高強度･高機能化基盤研究開発プロジェクト「A-USC プロジェクトの概要と今後の展開」	H24.1
	NEDO 鉄鋼材料の革新的高強度･高機能化基盤研究開発プロジェクト「A-USC ボイラ用材料と製作技術の開発」	H24.1
	2nd EPRI-NPL Workshop on Scale Exfoliation From Steam-Touched Surfaces「Steam oxidation properties of candidate materials for 700C A-USC boilers」	H24.1
	九州経済産業局　第８回 九州低炭素システム研究会「A-USC ボイラ候補材料とボイラ製作技術の開発」	H24.1
	日本鉄鋼協会　第 163 回春期講演大会「タービンロータ用 Ni 基超合金の機械的性質に及ぼす熱処理条件の影響」	H24.3
	日本鉄鋼協会　第 163 回春期講演大会「Ni 基超合金の機械的性質に及ぼすσ金属間化合物の影響」	H24.3
	化学工学会第 77 年会「グリーンイノベーションに向けた次世代 A-USC ボイラの開発への取り組み」	H24.3
	石炭･炭素資源利用技術第 148 委員会　第 132 回研究会「石炭火力発電の高効率技術開発」	H24.2

	12th International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures「 Development of a Ni-based Superalloy for the Rotor Material of A-USC Turbine Power Generation」	H24.5
	日本金属学会九州支部 合同学術講演会「700℃級ボイラ伝熱管向け Ni 基合金の高温腐食特性評価」	H24.6
	日本鉄鋼協会第１６４回秋季講演大会「Ni-0.04C-26Cr-21Co-1Al-1.9Ti-1.8Nb 鋳造合金のクリープ強度に及ぼす偏析の影響」	H24.9
	日本鉄鋼協会第１６４回秋季講演大会「A-USC 用 Ni 基超合金大型鍛造素材の機械的性質」	H24.9
	日本鉄鋼協会第１６４回秋季講演大会「Fe/Ni 異材溶接界面の組織変化に及ぼす熱時効の影響」	H24.9
	IEA Clean Coal Center Workshop 'Advanced ultrasupercritical coal-fired power plants'「 Advanced USC Technology Development in Japan」	H24.10
	第５６回日本学術会議材料工学連合講演会「A-USC ボイラ材料の異材溶接部のクリープ強度」	H24.10
	日本鉄鋼協会第１６５回春季講演大会「Fe/Ni 異材溶接界面における C 拡散に及ぼす溶質元素の影響」	H25.3
	日本金属学会 2013 年春季大会「700℃級 A-USC プロジェクトの現状と課題」	H25.3
	日本鉄鋼協会 2013 年秋季大会「Alloy625 大型鋳造材の析出挙動」	H25.9
	39th MPA-Seminar「 The on-going and planned activities of the A-USC project in Japan」	H25.10
	EPRI / 7th Int.Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Powe Plants「Verification of Long-Term Creep Rupture Strength and Component, Fablicability of Candidate Ni based materials for A-USC Boilers」	H25.10
	EPRI / 7th Int.Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Powe Plants「Evaluation of creep rupture strength in Ni-based alloy weldments for an advanced USC Boiler」	H25.10
	EPRI / 7th Int.Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Powe Plants「Hot corrosion	H25.10

	properties of Ni-based alloys used in an advanced-USC boiler」	
	EPRI / 7th Int.Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Powe Plants「Fabrication trials of Ni-based alloys for advanced USC boiler application」	H25.10
	EPRI / 7th Int.Conf. on Advances in Materials Technology for Fossil Powe Plants「ADVANCED USC TECHNOLOGY DEVELOPMENT IN JAPAN」	H25.10

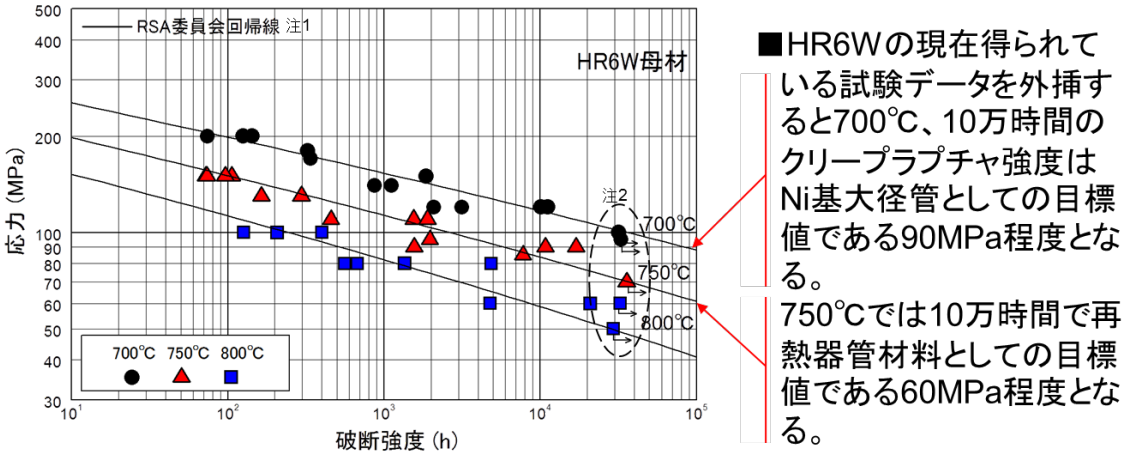
表 3-1-3　特許・論文等件数

	件数
論文数	10
学会誌等投稿数	7
発表数	59
特許件数	1

３－２　目標の達成度

ボイラ候補材料の HR6W に関するクリープ破断寿命を図 3-18 に示す。図中で矢印付きのデータはまだ破断せずに試験進行中であることを示している。HR6W は Ni 基合金で現在得られている試験データを外挿すると 700℃、10 万時間のクリープラプチャ強度は Ni 基大径管としての目標値である 90MPa 程度となる。さらに、750℃では 10 万時間で再熱器管材料としての目標値である 60MPa 程度となる。

図 3-19 に示す HR6W の溶接継手の寿命も母材と同等以上であり、期待通りの性能を示している。



注 1:RSA 委員会とは火力関係設備効率化技術調査委員会（発電設備技術検査協会主催）の略称であり、新材料の特性や、新技術に関する必要かつ十分な調査を実施した。回帰線は当該委員会で得られた材料クリープ破断データから得られた回帰曲線である。
注 2:矢印は長時間クリープ破断試験を遂行中（まだ破断していない）ことを意味する。

図 3-18　HR6W 母材のクリープ寿命（板材,ラボ FB 厚肉管，大径管，小径管）

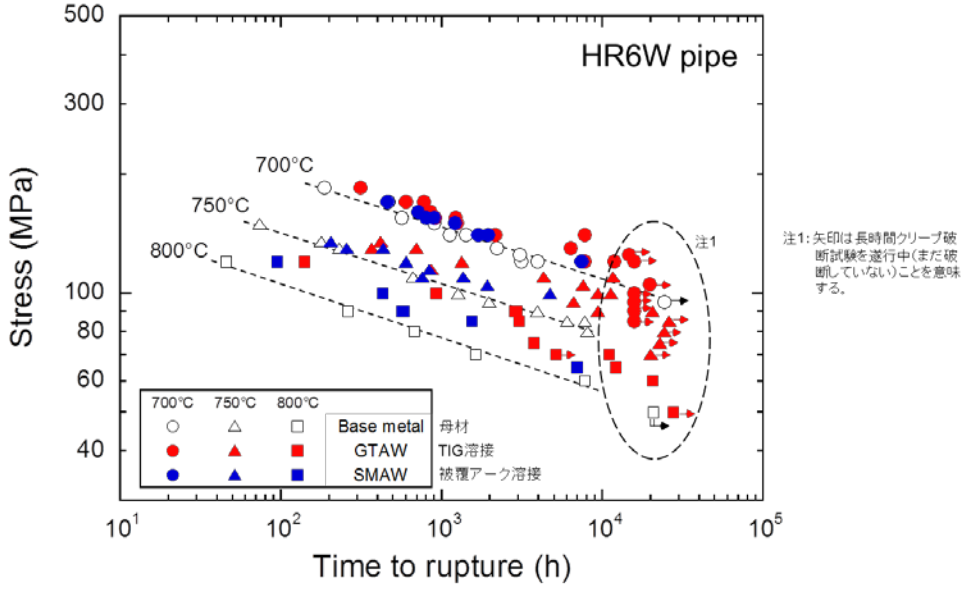


図 3-19　HR6W 溶接継手のクリープ寿命

大径管候補材料である HR35 のクリープ破断寿命を図 3-20 に示す。HR35 は Ni 基合金であり、現在得られている試験データを外挿すると 700℃、10 万時間のクリープラプチャ強度は Ni 基大径管としての目標値である 90MPa を優に超える。溶接継手の寿命も母材を上回っており、期待通りの性能を示している。

図 3-21 に示す HR35 の溶接継手の寿命も母材と同等以上であり、期待通りの性能を示している。

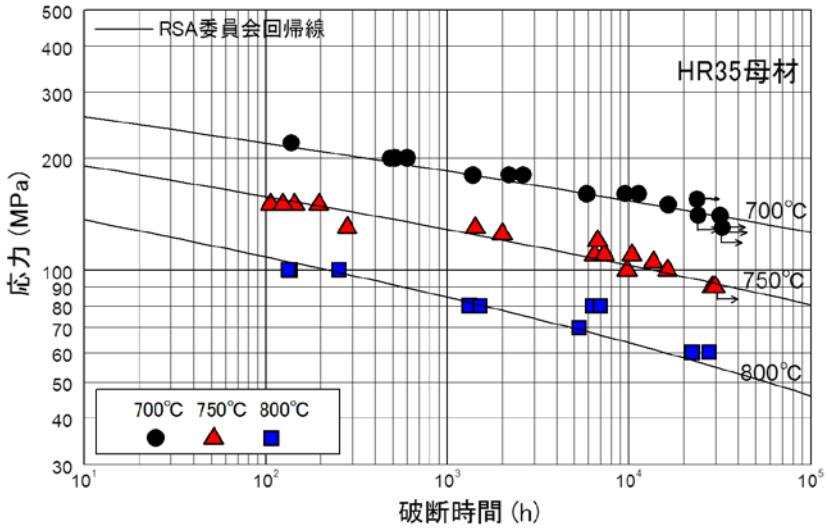


図 3-20　HR35 母材のクリープ寿命

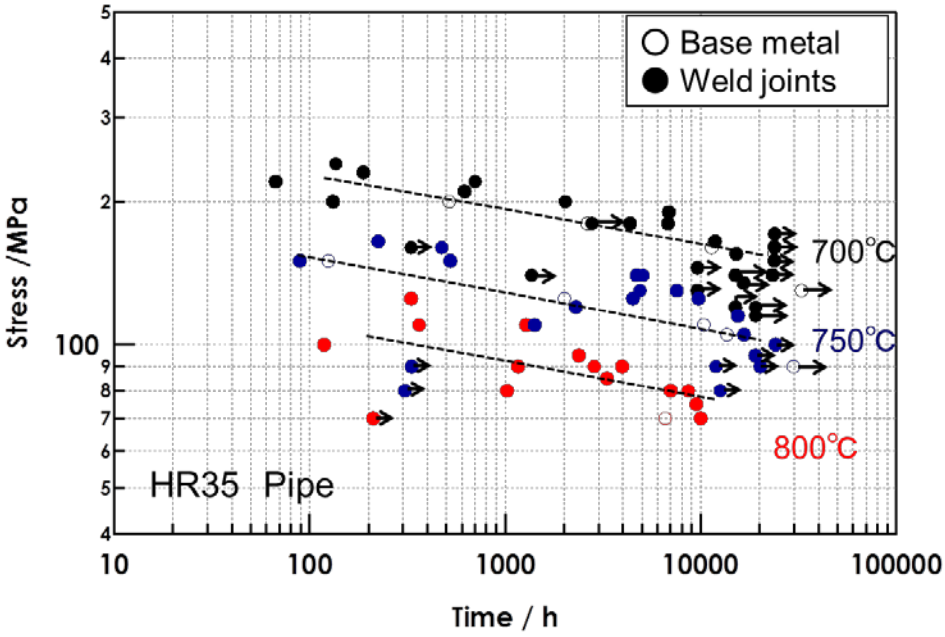


図 3-21　HR35 溶接継手のクリープ寿命

伝熱管候補材料である Alloy263 のクリープ破断寿命を図 3-22 に示す。

Alloy263はNi基合金であり、現在得られている試験データを外挿すると750℃、10万時間のクリープラプチャ強度はNi基伝熱管としての目標値である90MPaを優に超える。

図 3-23 に示す Alloy263 の溶接継手の寿命も母材と同等以上であり、期待通りの性能を示している。

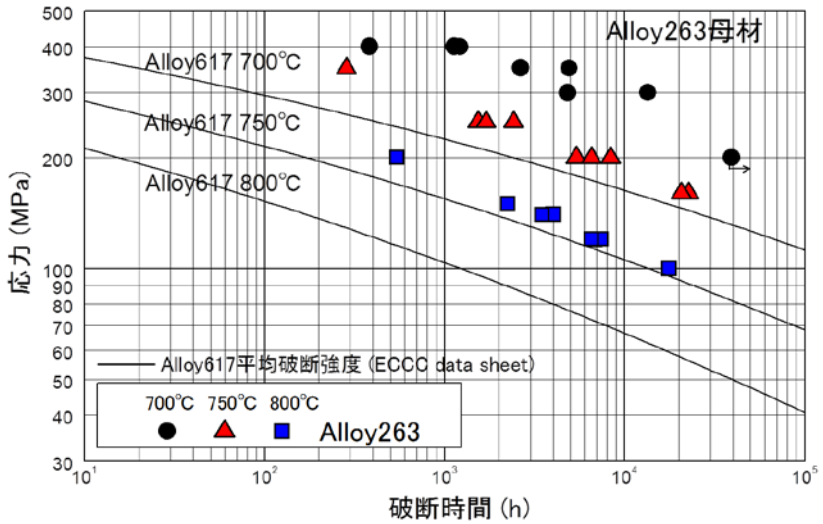


図 3-22　Alloy263 母材のクリープ寿命（板材,ラボ FB 厚肉管，小径管）

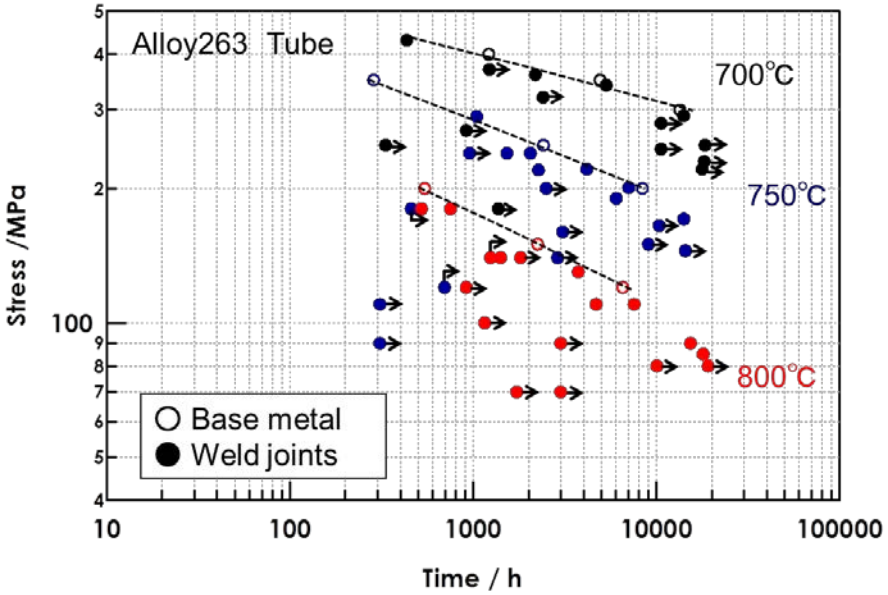


図 3-23　　Alloy263 溶接継手のクリープ寿命

図 3-24 にボイラ材料の高温腐食試験結果を示す。この試験ではボイラ燃焼ガスに曝される伝熱管外表面の高温腐食を想定し、700℃の腐食環境下での材料の減量を測定している。材料のクロム含有量に対して減量をプロットしている。

候補 Ni 基系材料はどれもクロム含有量が多いので、耐腐食性が良好であることが確認された。

図 3-25 にボイラ材料の水蒸気酸化試験結果を示す。この試験では高温の水蒸気に曝される伝熱管、大径管内表面の水蒸気酸化によるスケール発生と減肉を想定し、750℃の水蒸気環境下での材料表面でのスケールを観察している。これまで 10,000 時間の試験を行ったが、候補 Ni 基系材料のスケール厚さ（各写真の中央部にある灰色の層）は全て 5μm 程度で，現用オーステナイト鋼に比べ，スケール厚さは薄く，良好な耐水蒸気酸化性を示している。

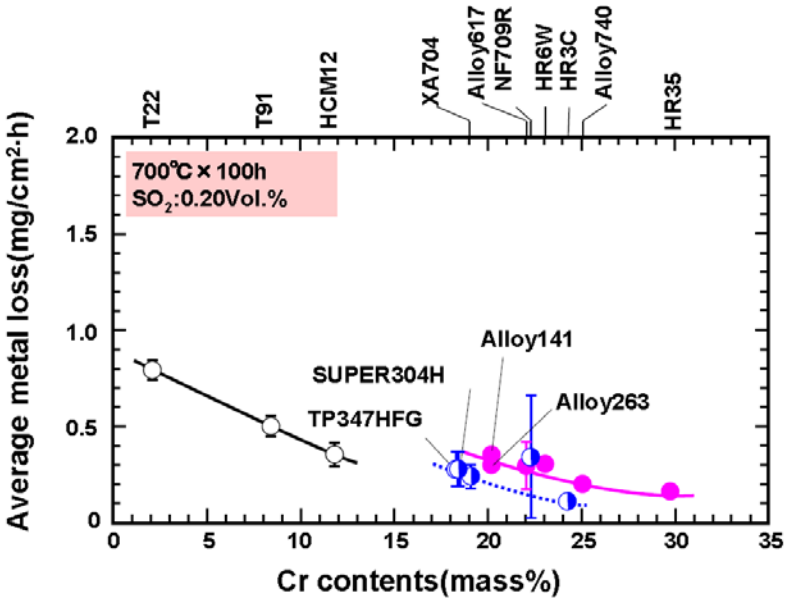


図 3-24　ボイラ材料の高温腐食

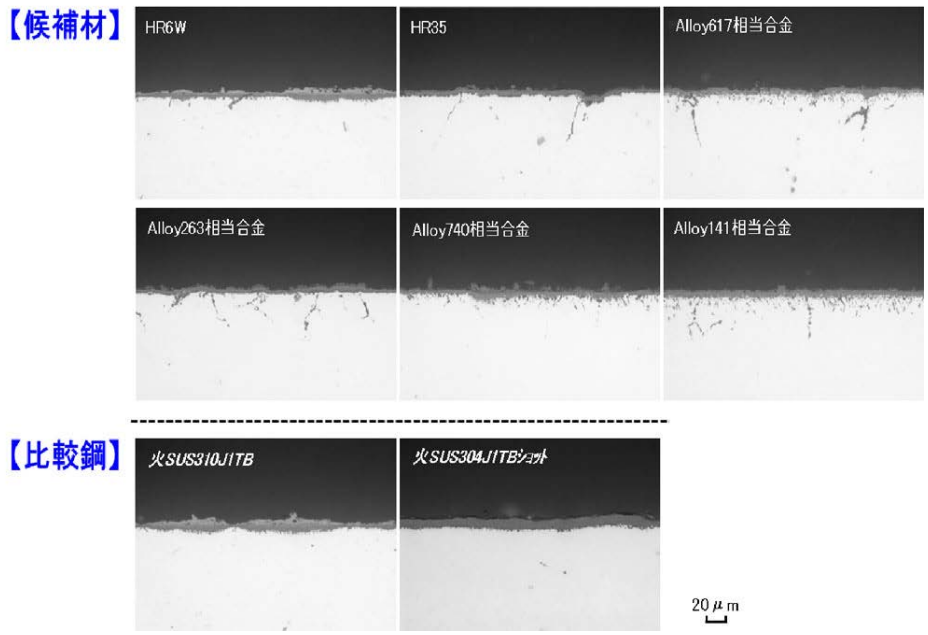


図 3-25　ボイラ候補材料の水蒸気酸化試験（750℃、10,000 時間）

タービンロータ材である FENIX700、LTES700R、TOS1X のクリープ破断寿命を図 3-26～図 3-28 に示す。TOS1X-II の開発が進められており、200MPa 程度の値を目指している。FENIX700 のクリープ破断試験は 7 万時間まで進んでおり強度は目標値（700℃×10 万時間クリープ強度 100MPa）を満足する見通しである。LTES700R、TOS1X-Ⅱのクリープ破断強度も目標値を十分満足する見通しである。

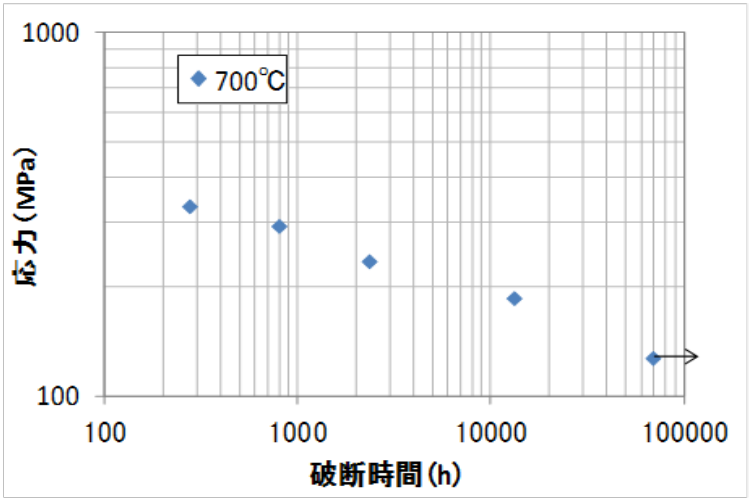


図 3-26　タービンロータ材料（FENIX700）のクリープ破断強度

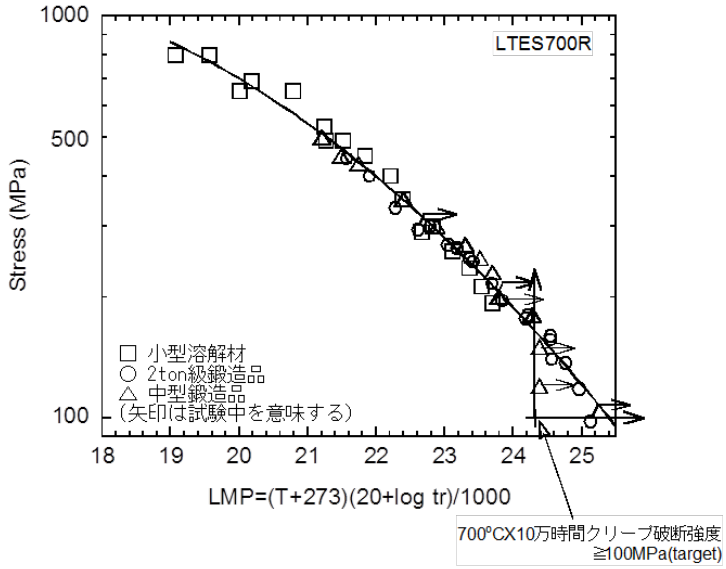


図 3-27　タービンロータ材料（LTES700R）のクリープ破断強度

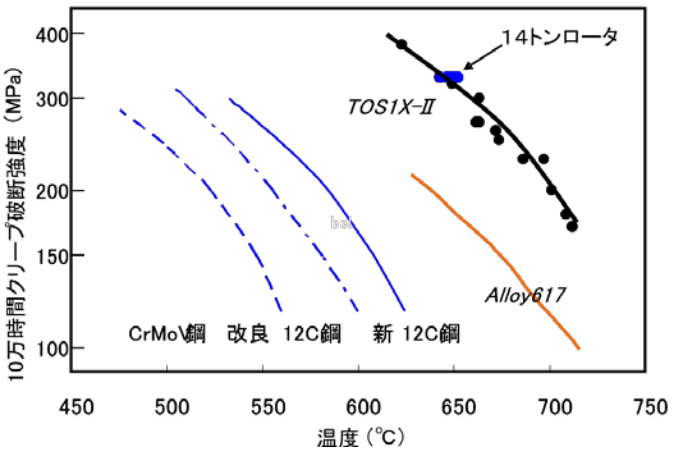


図 3-28　タービンロータ材料（TOS1X-Ⅱ）のクリープ破断強度

タービンケーシング材は当初 Alloy625、Alloy617、Alloy740 を候補材として選択し、それぞれの材料で中型鋳物であるステップブロックを製作した。その結果、Alloy740 では 300mm の肉厚部にクラックが発生し、タービン内部ケーシングや弁ケーシング等さらに大型の部材を製作することが難しいと判断された。故に、以下には Alloy625、Alloy617 のクリープ破断試験状況を図 3-29 と図 3-30 に示す。Alloy625、Alloy617 のクリープ破断試験は 3 万時間程度まで進んでおり強度は目標値（700℃×10 万時間クリープ強度 80MPa）を満足する見通しである。

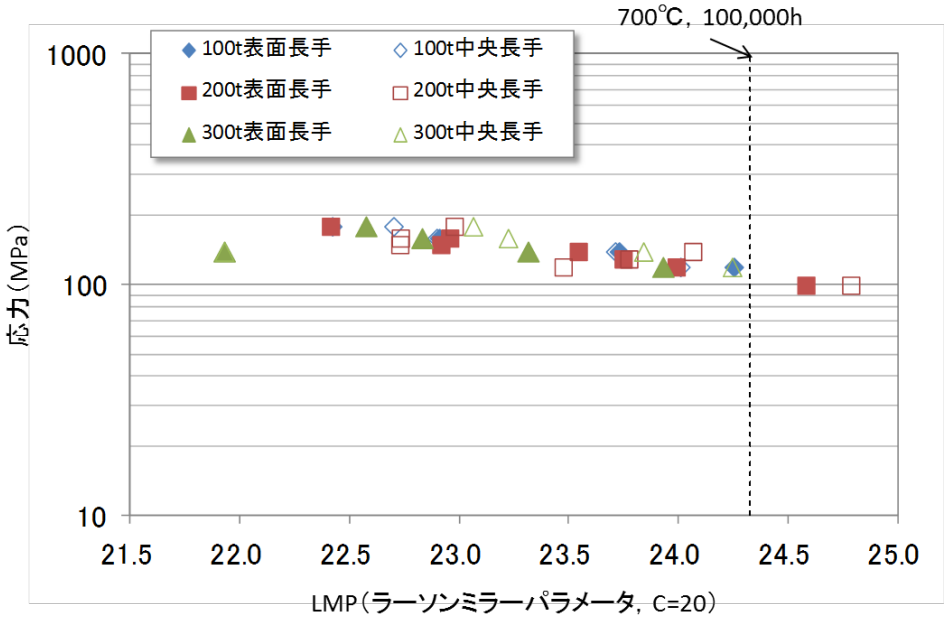


図 3-29　タービンケーシング材料（Alloy625）のクリープ破断強度

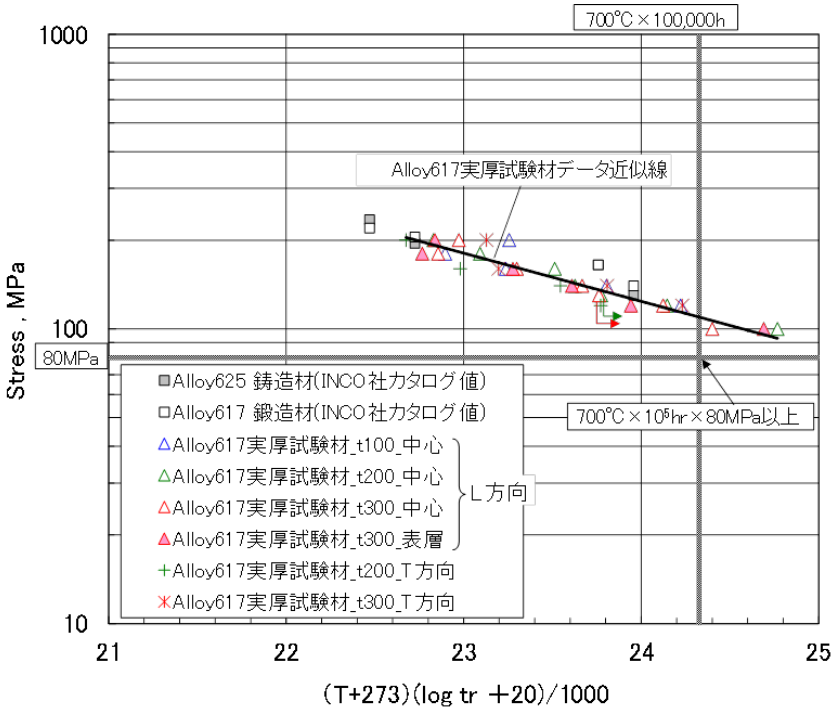


図 3-30　タービンケーシング材料（Alloy617）のクリープ破断強度

高温弁については Ni 基合金、Co 基合金、耐摩耗コーティング材等の組合せで 700℃の環境下で摺動摩耗試験を実施した。その結果、従来材料を 600℃の環境下で摺動させた場合よりも摩耗量が少ない組合せを見出した。図 3-31 にはその結果を示す。中央の破線が従来材料を 600℃の環境下で摺動させた場合の摩耗量である。ケーシング材料である Alloy625 鋳造材のクリープ破断特性を図 3-32 に示す。強度は目標値（700℃×10 万時間クリープ強度 80MPa）を満足する見通しである。

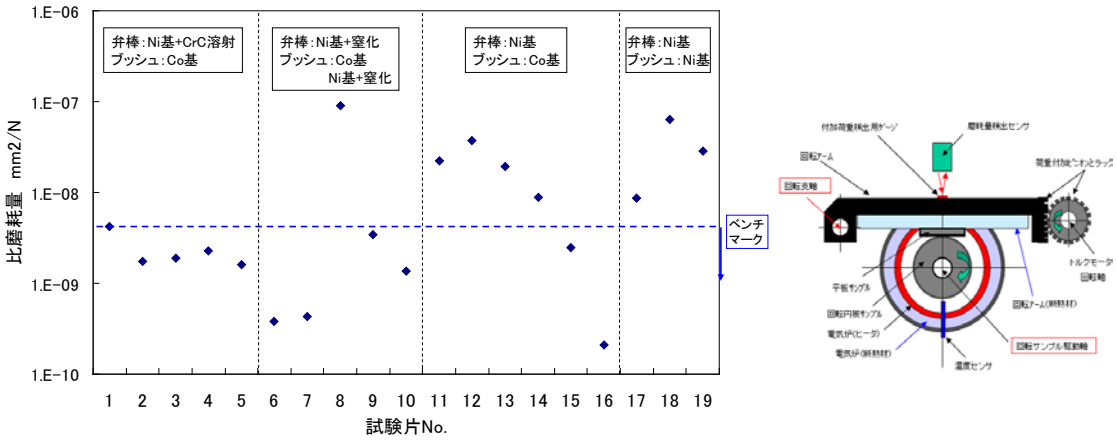


図 3-31　高温弁材料の高温摺動磨耗試験

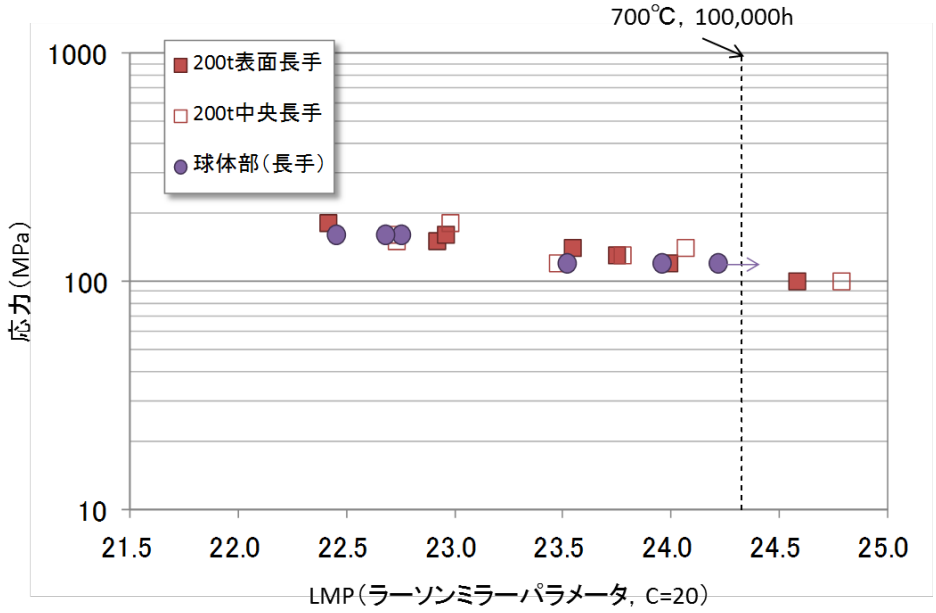


図 3-32　Alloy625 ステップブロックと試作高温弁（球体部）とのクリープ破断特性比較

これまで得られた結果を総括すると表 3-2 のようになる。

表 3-2　目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
システム設計、設計技術開発	基本設計、配置最適化 経済性検討完了	システム設計により熱効率 46%を確認した。 二酸化炭素を 10%低減しているにもかかわらず、従来の USC 並み以下の発電コストであることを確認した。	達成
ボイラ要素技術開発	選定された候補材料で 3 万時間程度の試験からの外挿により以下目標の達成可能性を検討する。	6 種類の Ni 基合金と 3 種類の 9Cr 鋼を試作し、3 万時間程度の短時間材料試験を実施した。この試験結果を 10 万時間まで外挿することにより、目標を達成できる見通しが得られた。今後、実際に 10 万時間まで試験を継続し、確認をする。	達成
タービン要素技術開発	候補材料を選定し、数千から一万時間程度の短時間試験からの外挿により達成の可能性を検討する。	6 種類の Ni 基合金と 3 種類の 9Cr 鋼を試作し、3 万時間程度の短時間材料試験を実施した。この試験結果を 10 万時間まで外挿することにより、目標を達成できる見通しが得られた。今後、実際に 10 万時間まで試験を継続し、確認をする。	達成
高温弁要素技術開発	摺動試験、水蒸気酸化試験、熱衝撃試験等の要素試験により材料選定作業を行い、最適な弁材料を見出す。	弁材料の摺動試験、水蒸気酸化試験等を実施し、700℃条件下で使用できる材料の組合せがあることを見出した。	達成

		実機高温弁の設計を実施し、鋳造による大型弁ケーシングの製造性を確認した。	
実缶試験・回転試験	試験設備の基本設計を完了する。	試験設備の基本設計を完了した。	達成

４　事業化、波及効果について

４－１　事業化の見通し

経年化していく既設の石炭火力発電所の更新には地球温暖化の観点からA-USC 技術は欠かせないものになると考えられ、二酸化炭素削減圧力が強まる中、今後本技術実用化への期待はさらに高まると推測される。また、東日本大震災の結果、石炭火力への期待は高まっていると考えられ、実用化へさらに短時間で至る道筋を探すことが必要である。

事業化に向け本研究開発に引き続き実証機の建設及び運転試験を行うことにより、システム全体の信頼性、運用性、性能、材料の健全性、環境性等を総合的に評価、検証するべきである。特に、ボイラ、タービンを接続する大径管や大型高温弁の挙動、健全性、またタービンシステムや環境性といったシステム上の問題や耐久性の確認が主たる検証項目となる。

４－２　波及効果

① 近年二酸化炭素排出量削減の観点からバイオマス燃料が脚光を浴びている。A-USC 技術による石炭とバイオマス燃料の混焼は、バイオマス燃料を効率良く利用できる一つの方法であり効果的な二酸化炭素削減に寄与する。

② 近年一次エネルギー確保のために調達手段の拡大の観点から重油燃料が見直されている。A-USC 技術はこのようなニーズに対しても、効果的な二酸化炭素削減技術として応えることができる。

③ A-USC 技術は天然ガス焚きコンバインドサイクルのボトミング条件の向上にも対応できる技術である。現在 1600℃級のコンバインドサイクルが実用化段階にあるが、排ガス温度の高温化に伴いボトミングサイクルの蒸気温度は600℃まで高められている。将来 1650℃級、さらには 1700℃級とガスタービン温度が上昇することに伴い、ボトミングサイクルの蒸気温度も 650℃以上になることが予想され、A-USC 技術が必要となる。

５　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

５－１　研究開発計画

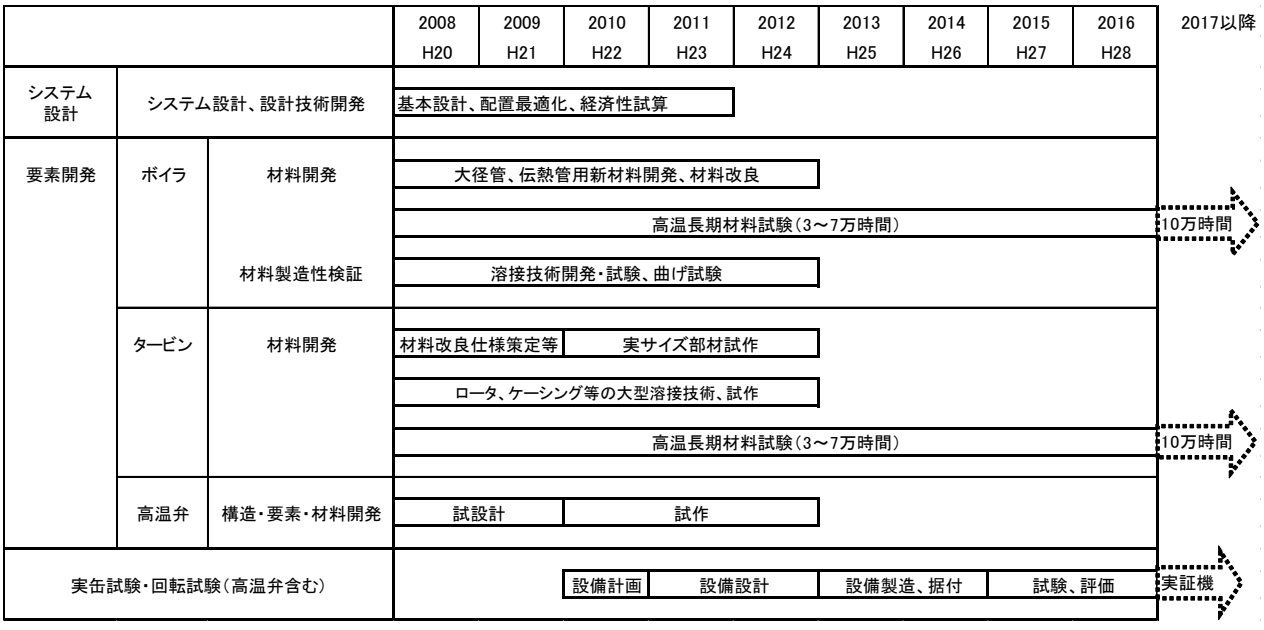
本研究開発においては、実証機を実現するための要素技術開発を実施する。

要素技術には「システム設計」、「ボイラ要素技術開発」、「タービン要素技術開発」、「高温弁要素技術開発」、「実缶・回転試験」がある。

前半の 5 年間では材料開発、評価を主体とした研究開発を行い、後半の 4 年間でその成果を反映した「実缶・回転試験」を実施する。

材料の長期耐久性が重要であり、9 年間の事業期間を通じて「高温長期材料試験」を継続する。材料の開発目標は 10 万時間のクリープラプチャ強度を基準としているが、本事業期間では最大 7 万時間まで試験を行う。一般に 10 万時間のクリープラプチャ強度を予想するには 3 万時間のデータからの外挿が可能とされており、この手法により 10 万時間のクリープラプチャ強度を予測する。本事業以降も、「高温長期材料試験」を延長し 10 万時間試験を実施する予定である。

後半 4 年間の「実缶・回転試験」ではボイラで 1 万時間以上の耐久試験を行うことになっており、純粋な試験時間だけでも 1 年半を要する。その前後に試験装置製作・設置、試験結果の評価を行う。



５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

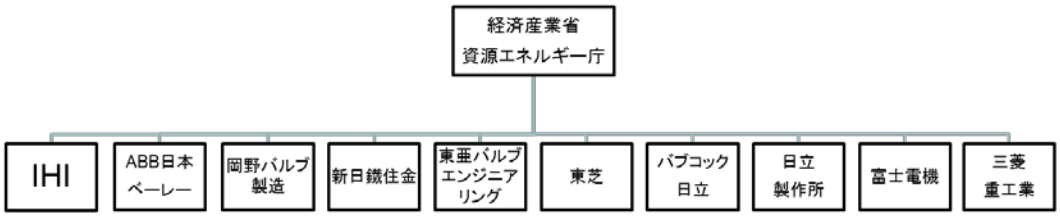


図 5-2-1　事業体制

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、IHI、ABB 日本ベーレー、岡野バルブ製造、新日鐵住金、東亜バルブエンジニアリング、東芝、 バブコック日立、 日立製作所、富士電機、三菱重工業が経済産業省からの補助を受けて共同で実施している（図 5-2-1）。また、補助事業者以外の中部電力、電源開発、電力中央研究所、物質・材料研究機構、高効率発電システム研究所も開発に貢献している（図 5-2-2）。

また、研究開発の実施に当たっては、研究開発を統括するために「A-USC 開発推進委員会」を設置し、その下にタービン要素技術の統括するための「タービン分科会」、ボイラ要素技術の「ボイラ分科会」、高温弁技術の「バルブ分科会」、実缶試験の「実缶試験分科会」を置いた。プロジェクトリーダーは「A-USC 開発推進委員会」の議長を務める高効率発電システム研究所代表理事の福田雅文である。

電力会社、学会等からの参加を得て、毎年 1 回成果報告会を火力原子力発電技術協会主催で開催している。毎年、本成果発表会には 130 名程度の参加者を得ている。

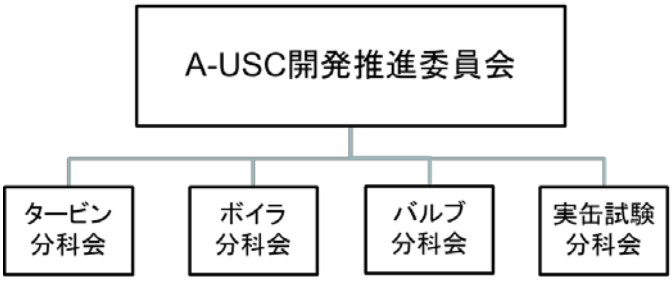


図 5-2-2　研究開発実施体制

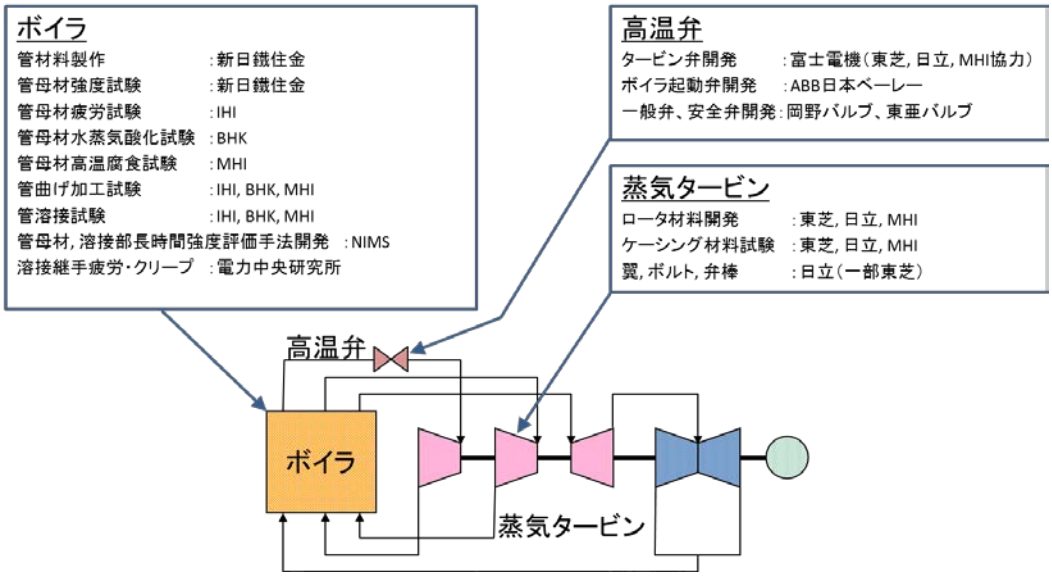

ボイラ
管材料製作 :新日鐵住金
管母材強度試験 :新日鐵住金
管母材疲労試験 :IHI
管母材水蒸気酸化試験 :BHK
管母材高温腐食試験 :MHI
管曲げ加工試験 :IHI, BHK, MHI
管溶接試験 :IHI, BHK, MHI
管母材, 溶接部長時間強度評価手法開発 :NIMS
溶接継手疲労・クリープ :電力中央研究所
高温弁
タービン弁開発 :富士電機(東芝, 日立, MHI協力)
ボイラ起動弁開発 :ABB日本ベーレー
一般弁、安全弁開発 :岡野バルブ、東亜バルブ
蒸気タービン
ロータ材料開発 :東芝, 日立, MHI
ケーシング材料試験 :東芝, 日立, MHI
翼, ボルト, 弁棒 :日立(一部東芝)
高温弁
ボイラ
蒸気タービン

図 5-2-3　研究開発分担

５－３　資金配分

これまでは各社特に過不足なく推移している。

ただし、為替が急速に円高に推移した局面において、海外に発注する物件で予算を達成できなかったケースがある。

表 5-3　資金年度配分　　（単位：百万円）

	合計	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度
		2008年度	2009年度	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度
IHI	1,249	22	69	56	85	98	127	317	244	233
ABB日本ベーレー	131	---	16	22	21	25	20	9	8	9
岡野バルブ製造	153	---	---	---	---	60	25	45	12	11
新日鐵住金	1,215	103	184	174	187	174	120	113	90	71
東亜バルブエンジニアリング	233	---	---	---	---	60	26	123	13	10
東芝	2,462	29	192	280	372	360	550	291	219	170
バブコック日立	1,372	21	80	51	91	93	199	334	260	243
日立製作所	2,726	36	266	230	408	391	651	398	170	176
富士電機	370	30	30	23	72	41	53	75	21	25
三菱重工業	3,552	53	228	279	415	352	516	695	563	453
物質・材料研究機構	6	6	---	---	---	---	---	---	---	---
合計	13,469	300	1,064	1,114	1,650	1,654	2,287	2,400	1,600	1,400

５－４　費用対効果

全世界の将来市場規模を考えると 2006 年時点の全石炭火力約 1300GW が 50 年間（プラント寿命）かけてすべて IGCC と A-USC に 50%づつ置き換わったと仮定すると、年間の A-USC 建設需要は 1300／50×0.5＝13GW になる。

国内メーカの市場シェアを 20%と仮定すると年間 2.6GW。

プラント建設単価を 300 千円／kW とすると年間の建設費用は 7800 億円／年。

経常利益率を 5%、法人税率を 40%とすると、プラント建設会社の法人税は 156 億円／年となる。

本事業に要する費用は 9 年間で 130 億円であり、国が投入する補助金はその 2/3 の 87 億円である。将来の法人税収入はこの投入額に見合っていると考えられる。

５－５　変化への対応

事業開始時点から見ると、二酸化炭素排出削減の必要性はさらに高まっている。再生可能エネルギーや原子力による削減努力がさらに必要であるが、当初述べたように、エネルギーセキュリティーを確保する上で石炭の利用は引き続き必要である。このような状況下で A-USC の開発による石炭火力発電の熱効率向上は最も確実な対応策であり、その重要性は高まっている。また、排出された二酸化炭素を地中に貯留する CCS（Carbon Capture and Storage）が世界的に開発されつつあるが、CCS を石炭火力に適用すると熱効率が低下し、石炭の消費量が大幅に増す。そのため、A-USC を適用し、CCS による熱効率低下の影響を軽減することが重要であり、A-USC 技術の必要性がさらに高まっている。

Ｄ．次世代型双方向通信出力制御実証事業

１　事業の目的・政策的位置付け

１－１　事業目的

2010 年 6 月に閣議決定された「エネルギー基本計画」において、我が国が低炭素社会を実現していくための電力供給システムとして、再生可能エネルギー等の利用が中長期的に大幅に拡大する中、電力の安定供給を維持しつつ、社会的コストが最小となるような需給管理を可能とすること、またこれを実現するためには 2020 年代を目途に原則全ての電源や需要家と双方向通信が可能な次世代送配電ネットワークの構築を目指すことが述べられた。

これまで、「低炭素電力供給システムに関する研究会」、「次世代送配電ネットワーク研究会」等の有識者会議で取り纏められたように、太陽光発電の大量導入は電力系統の運用上、余剰電力発生、配電線の電圧上昇等多くの技術的課題をもたらし、その対策が求められている。既にいくつかの実証事業において、これらの諸課題に対応するための研究開発、実証試験が行われているが、上記２つの研究会に引き続き開催された「次世代送配電システム制度検討会」において、太陽光発電の出力制御の必要性、また、そのために将来必要な双方向通信技術を確立する必要性が 2011 年 2 月に取り纏められた。

このような中、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災に伴う深刻な供給力不足を背景に、これまで以上に太陽光発電を中心とする再生可能エネルギーが注目されている。

以上のような経緯、最新の情勢を踏まえ、太陽光発電の設置者における太陽光発電の出力抑制による発電機会損失を最小化するため、双方向通信機能による太陽光発電や系統側蓄電池等の制御に関する技術開発、および実証を行う。

１－２　政策的位置付け

エネルギー基本計画等で目標とされている 2020 年の太陽光発電の 2,800 万 kW 導入にあたっては、電力の安定供給の観点から、電力需要の少ない時期における余剰電力対策が不可欠であり、また、系統安定化コストの低減の観点から太陽光発電の出力抑制は効果的である。よって、太陽光発電の大量導入と電力の安定供給、系統安定化対策コストの低減を同時に達成するためにも、太陽光発電や系統側蓄電池の制御に係る機器の開発、実証等について早急に取り組む必要がある。

１－３　国の関与の必要性

太陽光発電等の再生可能エネルギーの大量導入は、国のエネルギー政策によって決定されたものであり、それに伴う系統安定化対策については、民間事業者である電力会社とともに国も責任を持って対応することが必要である。

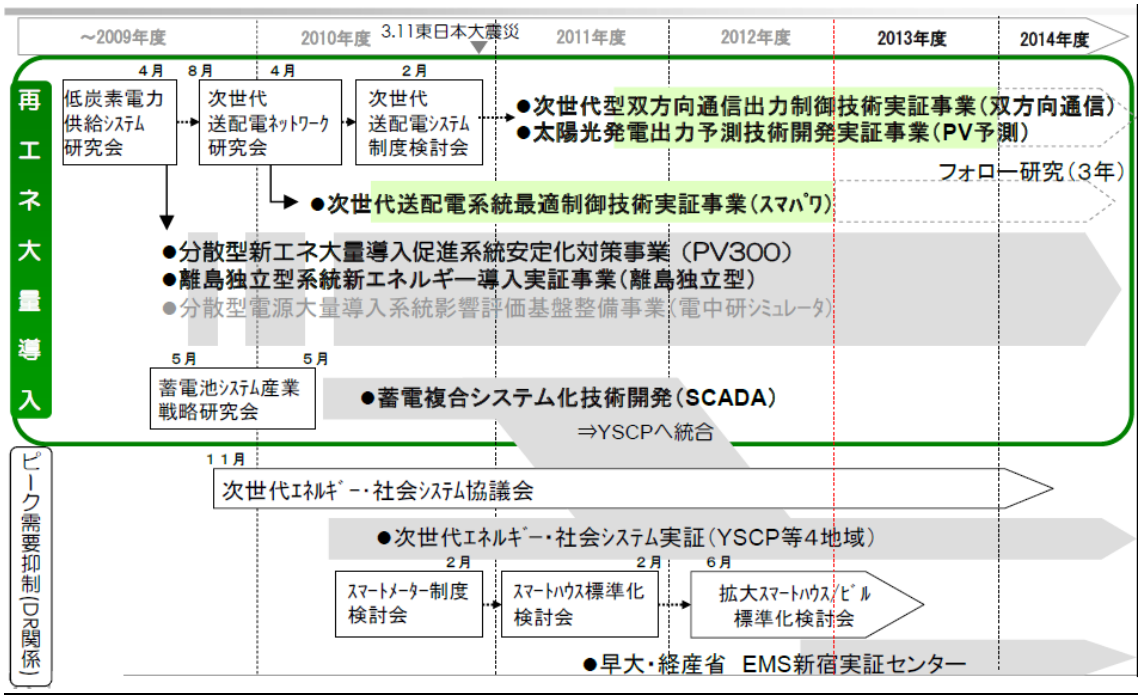


図１－１．実証プロジェクトの国の研究会との関係と実証期間

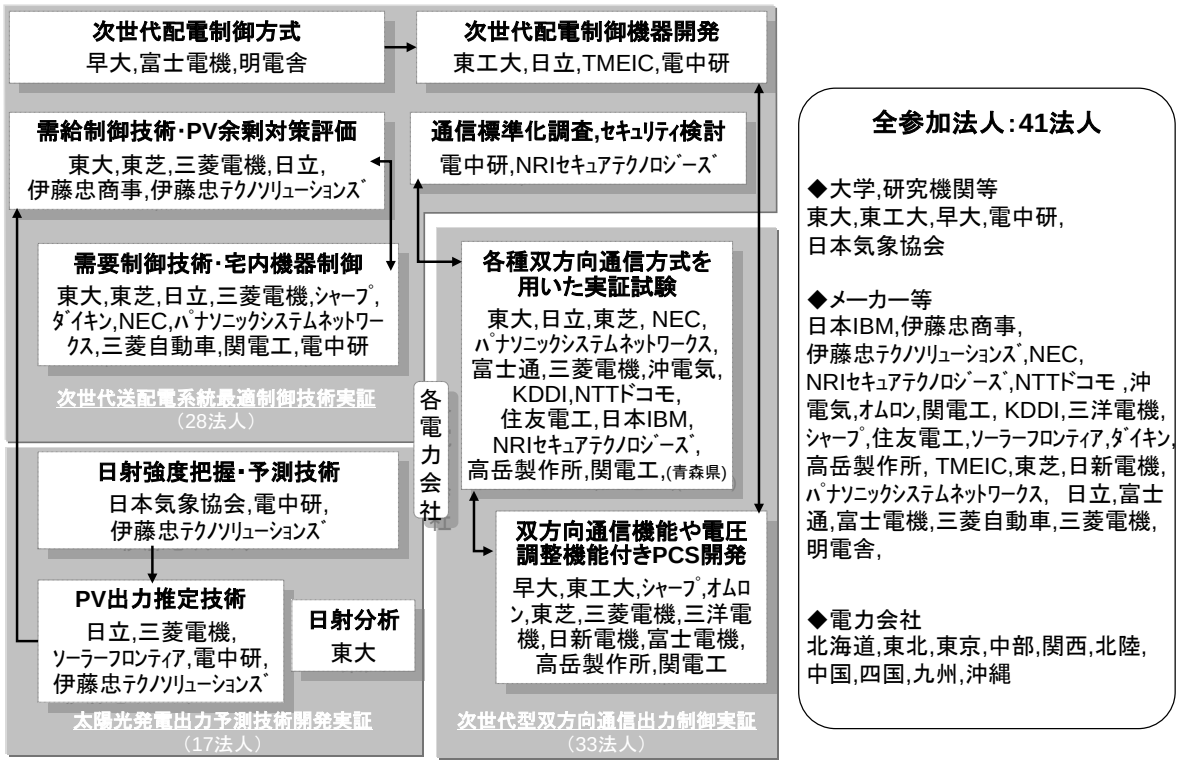


図１－２．次世代送配電制御、次世代双方向通信、PV 出力予測の実証体制

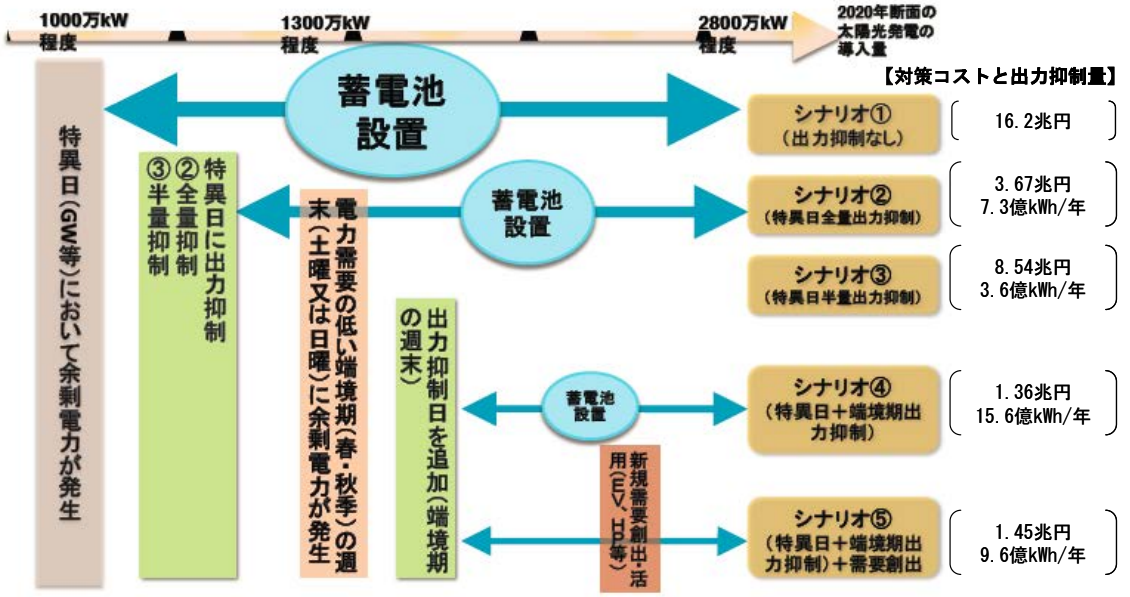


図１－３．系統安定化対策化シナリオと余剰電力対策量試算の考え方

※ 次世代送配電ネットワーク研究会報告書（平成２２年４月）より引用

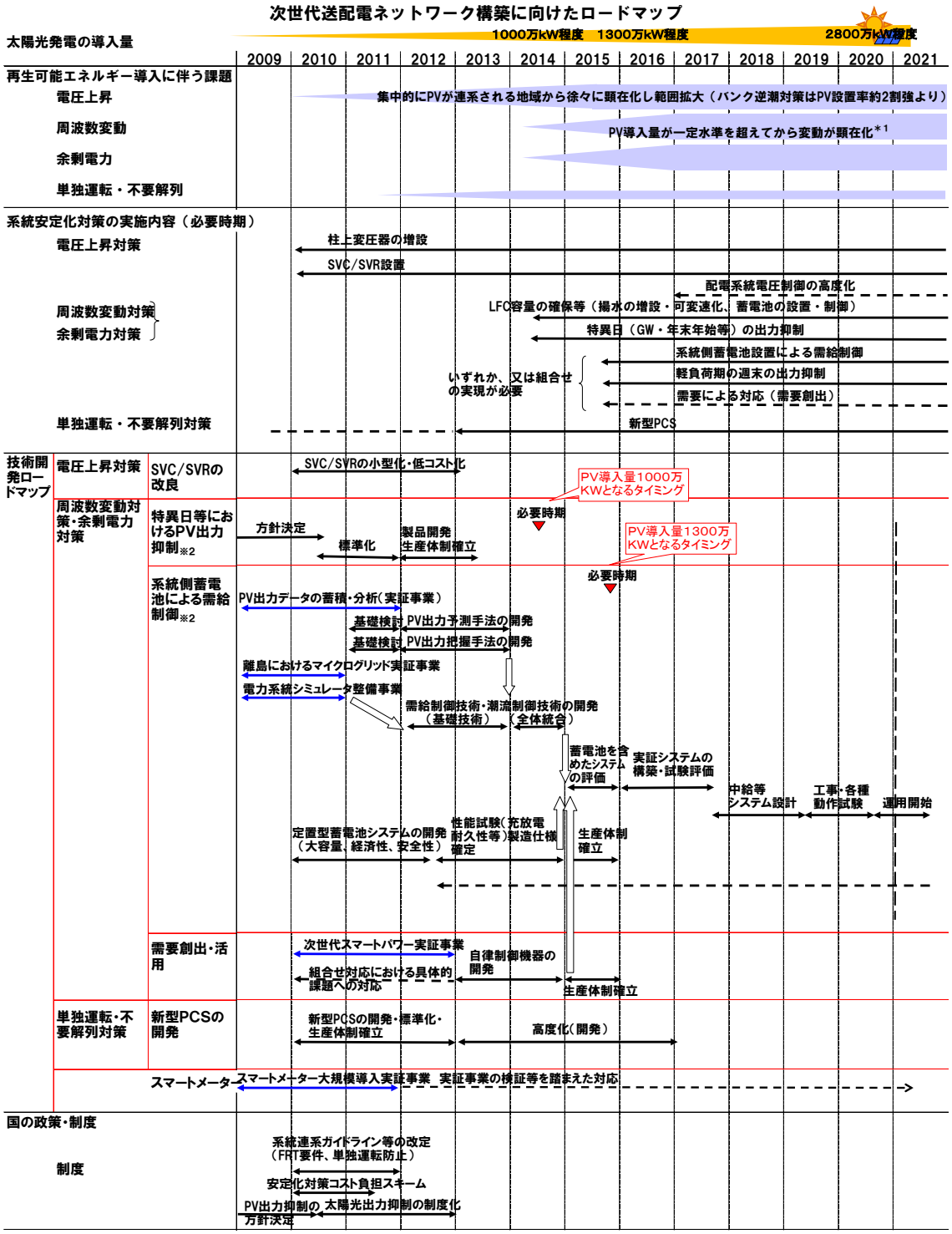


図１－４．次世代送配電ネットワーク構築に向けたロードマップ

※ 次世代送配電ネットワーク研究会報告書（平成２２年４月）より引用

（ＰＶ導入量見込み、対策時期等は研究会当時のもの）

２　研究開発目標

２－１　研究開発目標

太陽光発電の大量導入に備え、系統状況によって外部からの通信信号により出力をコントロールできる太陽光発電用 PCS（Power Conditioning System: 直流交流変換装置）を開発するとともに、通信と組み合わせた試験を実施する。

試験では、PCS の設置環境として、住宅地・商業地・農村などの地域環境、宅内・宅外といった設置場所など、様々な状況を想定して、今後適用が期待される電力系統と需要家を結ぶ種々の通信手段を用いた試験を実施する。試験は、実証フィールドや参加法人の自社敷地内を用いて基礎的・系統的な試験を行うとともに、実際の住環境におけるフィールドテストを青森県六ヶ所村の青森フィールドで実施する。さらに、蓄電池など一般の太陽光発電システム以外の要素についても、双方向通信によって制御する試験を実施する。

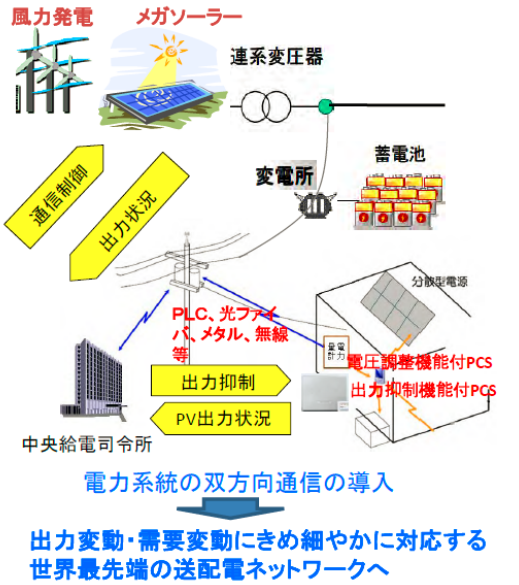


図２－１．実証概要

※ www8.cao.go.jp/cstp/budget/saisyu/sanko40.pdf より引用

２－２　全体の目標設定

表２－１．全体の目標

目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
太陽光発電の大量導入に備え、系統状況によって外部からの通信信号により出力をコントロールできる太陽光発電用 PCS 等の開発、およびその PCS 等を制御するための通信方式の開発	太陽光発電の大量導入に備え、系統状況によって外部からの通信信号により出力をコントロールできる太陽光発電用 PCS 等の開発、およびその PCS 等を制御するための通信方式の開発	双方向通信により、太陽光発電の出力制御を実現するシステムを構築するため、新たに開発する。

２－３　個別要素技術の目標設定

表２－２．個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
①通信による出力制御が可能な太陽光発電用 PCS（住宅用、事業用）	・通信機能付き太陽光発電用 PCS の開発 ・通信信号に応じて出力をコントロールできること	・通信機能付き太陽光発電用 PCS の開発 ・通信信号に応じて出力をコントロールできること	現状の太陽光発電用 PCS にデータ通信によって制御信号などの授受を行う機能を付加することにより遠隔での制御の実現可能性を確認するため。
②通信による出力制御が可能な蓄電池用 PCS	・通信機能付き蓄電池用 PCS の開発 ・通信信号に応じて出力をコントロールできること	・通信機能付き蓄電池用 PCS の開発 ・通信信号に応じて出力をコントロールできること	現状の蓄電池用 PCS に、データ通信によって制御信号などの授受を行う機能を付加することにより遠隔での制御の実現可能性を確認するため。
③電圧調整機能付き PCS	・シミュレーション等の検討で選定された最適な制御方式を具備した PCS の開発 ・安定的に動作すること	・シミュレーション等の検討による最適な制御方式の選定、その機能を具備した PCS の試作 ・安定的に動作すること	選定された制御方式を具備した電圧調整機能付き PCS が安定的に機能しているか確認するため。
④双方向通信機器	・PCS の出力制御を実現する種々の双方向通信機器の開発 ・安定的かつ確実に動作すること	・PCS の出力制御を実現する種々の双方向通信機器の開発 ・安定的かつ確実に動作すること	電力会社が保有する通信網（光ファイバー、メタルケーブルなど）、通信事業者による広域サービス（携帯電話、WiMAX など）を

			有効に活用しつつ、ローカルに通信網を形成するための無線 LAN、特小無線（900MHz 帯、400MHz 帯）や、電線そのものをインフラとして活用する電力線搬送（PLC）が PCS 制御の要件を満たしていることを確認するため。
⑤サイバーセキュリティ関連機器	・通信ネットワークに内在する脆弱性の検討・セキュリティ技術の開発 ・想定される攻撃からネットワークを保護できること	・通信ネットワークに内在する脆弱性の検討・セキュリティ技術の開発 ・想定される攻撃からネットワークを保護できること	双方向通信によって、太陽光発電や蓄電池を含む機器・システムを制御する状況では、相応のセキュリティ確保が必要であるため。

３　成果、目標の達成度

３－１　成果

３－１－１　全体成果

将来の太陽光発電の大量導入に備え、系統状況によって外部からの通信信号により出力をコントロールできる PCS を開発するとともに、通信と組み合わせた検証試験を実施することを目的とした研究計画に基づき、下記に示す５つの要素技術の開発を実施した。

「通信による出力制御が可能な太陽光発電用 PCS（住宅用、事業用)」では、通信による出力制御実証試験を行う機能を検討し、通信装置とのインターフェースの共通仕様を取り纏め、それらを具備する機器開発を実施し、開発機器の動作試験および通信装置との接続試験を実施した。また現在、実環境へ PCS を設置しフィールド試験を実施中である。

「通信による出力制御が可能な蓄電池用 PCS」では、系統制御用途および需要家用途を想定した双方向通信機能を有する蓄電池用 PCS について、充・放電電力制御方法や主回路定格などの基本仕様ならびに通信機能仕様を検討し、それらを具備する機器開発を実施し、開発機器の動作試験および通信装置との接続試験を実施している。

「電圧調整機能付き PCS」では、太陽光発電用 PCS に具備することが可能な無効電力制御機能として、①電圧比例制御、②電圧一定制御（現行方式)、③定力率制御（全系で同一力率)、④電圧依存型定力率制御の４つの制御方式を定義した。この４方式の中から電圧上昇抑制効果や SVR(Step Voltage Regulator: 電圧調整器）タップ動作への影響、SVC（Static Var Compensator: 静止型無効電力補償装置）制御機能への影響、制御の安定性などを評価項目として、定力率制御方式、電圧依存型定力率制御方式を実証器に具備する制御方式として選定するとともに、基本制御仕様を検討・確定した。さらに前者を組み込んだ 3kW 級 PCS および後者を組み込んだ 50kW 級 PCS を製作し、工場試験を実施した。

「双方向通信機器」では、センターサーバと PCS 間の構成、通信手順、電文形式等を取り纏め、PCS の制御を目的とした双方向通信方式である公衆無線網（携帯電話､WiMAX)､特定小電力無線(900MHz 帯､400MHz 帯)､電力線搬送(PLC)、無線 LAN について必要となる機器を開発し､実証フィールド(青森フィールド、関電工フィールド、高岳フィールド）および参加法人の自社敷地内における試験を実施した。青森フィールドでは、開発した通信機器、PCS、PV を現地に設置し、試験を実施した。試験では、PCS の出力制御方式として、出力制御カレンダによる方式、および翌日出力制御情報による制御と当日制御を組み合わせた方式の２方式を採用した。関電工フィールドでは、開発した PCS を関電工事業所に設置し、青森フィールドのセンターサーバと PCS とを公衆無線網で接続し、PCS の直接制御を開始した。また、関電工事業所内に設置した BEMS との組み合わせによる PCS の出力制御の実証も開始した。高岳フィールドでは、開発

したPCSを高岳製作所事業所に設置し、青森フィールドからの直接制御試験を実施した。また、PLCと配搬信号との干渉試験を行い、運用上問題ないことを確認した。特定小電力無線および無線LANの試験では、無線周波数の違いや建物構造の違い等による伝搬特性の比較・評価などを実施した。

「サイバーセキュリティ関連機器」では、スマートグリッドシステムのセキュリティに関わる文献調査などにより、セキュリティリスクに対する対策方針について検討を行った。また、開発した侵入検知システムを青森フィールドに導入し、作成した対策方針を参考に、複数の検知方法についてそれぞれ検知結果の評価を実施した。

３－１－２　個別要素技術成果

（１）通信による出力制御が可能な太陽光発電用 PCS（住宅用、事業用）

下記の通り、通信による出力制御が可能な太陽光発電用 PCS の開発および試験を実施した。

評価指標は、PCS の開発および通信信号により出力制御できることであり、結果として、仕様に基づいた PCS を開発し、試験において確実に出力制御できることがわかり、良好な試験結果を得ることができた。

	参加法人	開発機器	設置場所	試験結果
①	オムロン	PCS（住宅用）	高岳フィールド 青森フィールド	良
②	東芝	PCS（住宅用）	青森フィールド	良
③	三洋電機	PCS（住宅用）	高岳フィールド 青森フィールド	良
④	シャープ	PCS（住宅用）	高岳フィールド	良
⑤	三菱電機	PCS（住宅用）	高岳フィールド	良
⑥	高岳製作所	PCS（事業用）	高岳フィールド	良
⑦	日新電機	PCS（事業用）	関電エフィールド	良

① 双方向通信出力制御機能を有する太陽光発電用 PCS 開発・試験（オムロン）

①－１　開発

通信アダプタからの指示により、即時に出力制御を実施する通信制御方式の太陽光発電用 PCS を 2 機種（4.0kW タイプと 5.5kW タイプ）開発した。

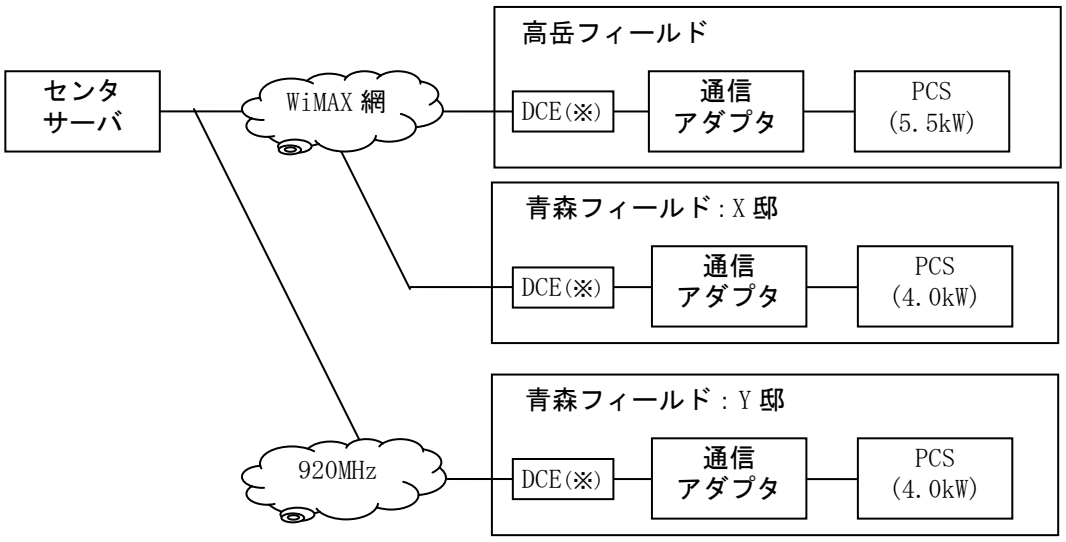
表３－１．PCS 仕様

型式	4.0kW タイプ	5.5kW タイプ
写真		

①－２　試験

高岳フィールド内の配電ネットワーク試験場、および青森フィールドの一般

家屋 2 軒のご協力を頂き、機器の動作状況や効果検証を実施した。通信アダプタからの制御要求に対しては、制御成功率 100%と確実に制御を実施することを確認し、試験結果は良好である。



(※)DCE(Data Circuit terminating Equipment)：データ回線終端装置

図３－１．試験機器構成

② 双方向通信出力制御機能を有する太陽光発電用 PCS の開発（東芝）

②－１　開発

系統側からのカレンダ情報を通信アダプタ側に処理させる制御方式（Simple PCS）にしたがって PCS を開発するとともに、プロトコル仕様は下記のとおり（図３－２）とした。

アプリケーション層	－
プレゼンテーション層	ECHONET Lite
セッション層	
トランスポート層	－
ネットワーク層	－
データリンク層	調歩同期
物　理　層	ＲＳ－４８５

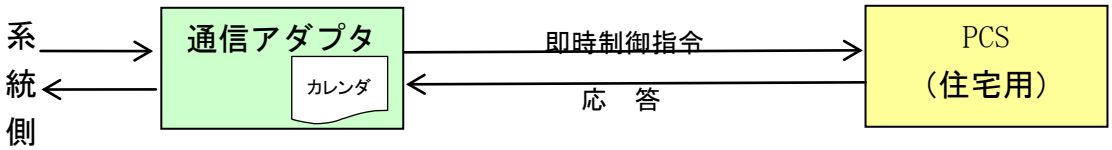


図３－２．プロトコル仕様

②－２　試験

開発した双方向通信出力制御機能付き太陽光発電用 PCS を実環境の中で試験動作させるため、PCS の他に太陽光発電パネルを含めた太陽光発電システムを六ヶ所村役場第二庁舎に設置した。

図３－３．PV および PCS 外観

双方向通信出力制御機能付きの太陽光発電用 PCS の状態は、通信モジュールを介して 2012 年 12 月から計測中であり、試験結果は良好である。

③ 双方向通信出力制御機能を有する太陽光発電用 PCS の開発（三洋電機）

③－１　開発

通信仕様書を踏まえ、弊社既存の PCS および送信ユニットの改造を行い、PCS の出力制御処理シーケンスと送信ユニットの通信処理部分については新たに開発を実施した。（図３－４の朱色部）

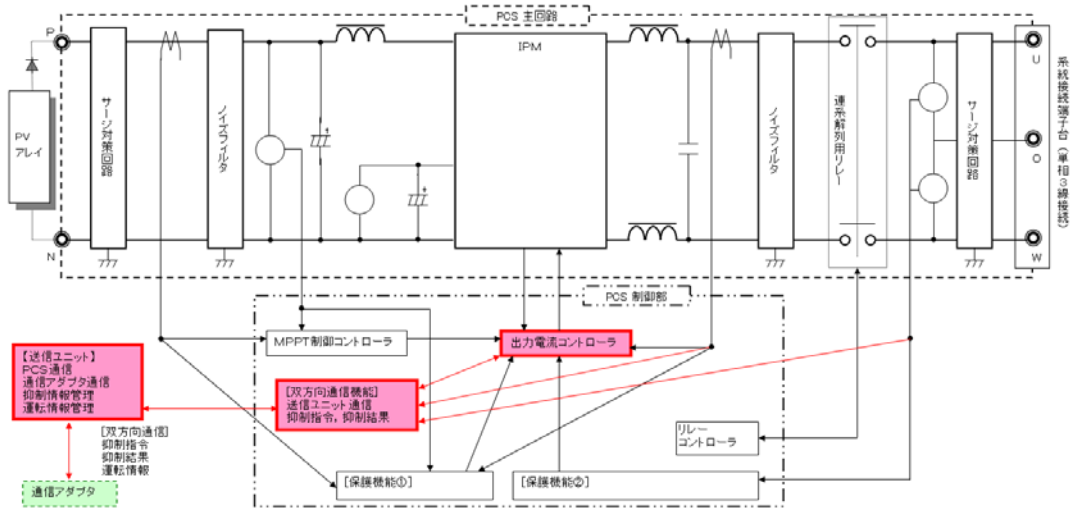


図３－４．PCS 回路図

③－２　試験

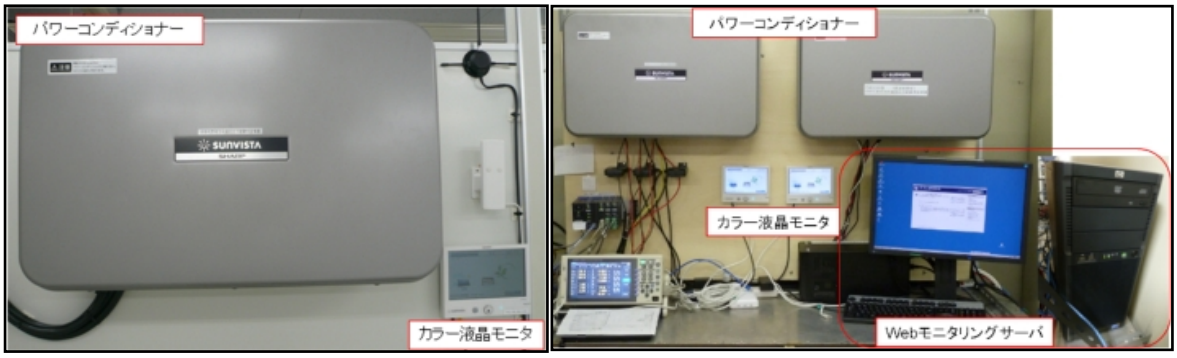
開発した機材を青森フィールド、高岳フィールドに設置し、遠隔からの双方向通信による出力制御が正常に動作することを確認しており、試験結果は良好である。図３－５に開発した PCS および送信ユニットの設置状態を示す。（通信アダプタとは壁内配線接続）

図３－５．PCS および送信ユニットの設置状態

④ 双方向通信出力制御機能を有する太陽光発電用 Intelligent PCS の開発、及びシャープ Web モニタリングサービスを利用した出力制御運転検証（シャープ）

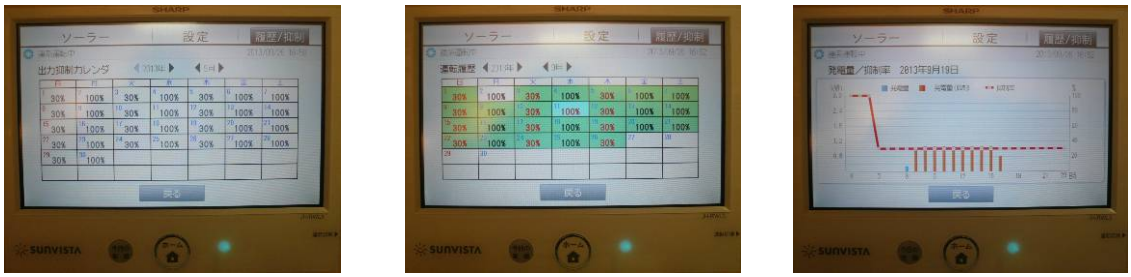
④－１　開発

開発した Intelligent PCS を図３－６に示す。出力制御予定の日時、抑制量を“出力制御カレンダ情報”として、また出力制御運転状況を“運転履歴情報”“発電量/出力抑制量”として PCS 内で管理するとともに、図３－７に示すように PCS 用カラー液晶モニタを用いて“見える化”を図った。



高岳フィールド(高岳製作所・小山)　　シャープ葛城事業所

図３－６．開発した Intelligent PCS と設置場所



出力制御カレンダ情報　　運転履歴情報　　発電量/出力抑制量

図３－７．カラー液晶モニタ　開発画面の一例

④－２　試験

シャープ Web モニタリングサービス（※）を利用して、多数台の PCS に対して一括した出力制御運転を実現できることを目的に試験を行った。

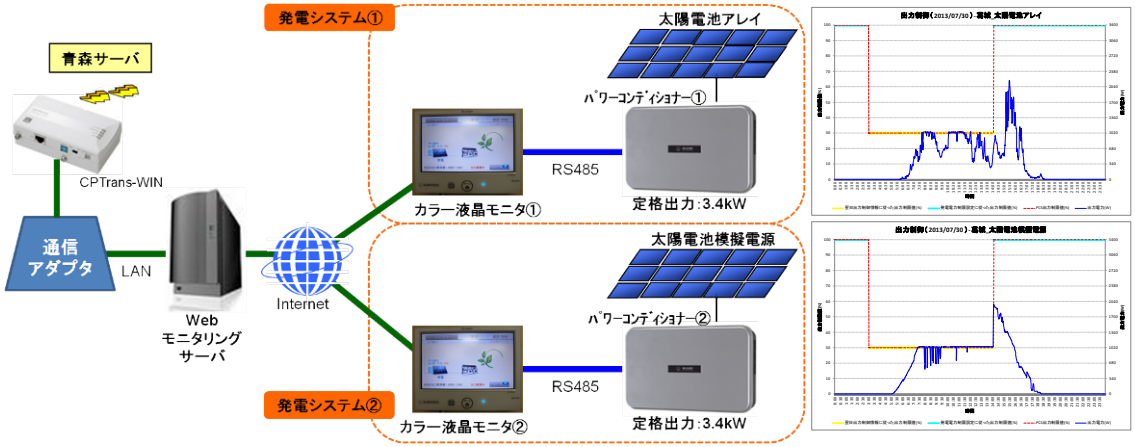


図３－８．Web モニタリングサービスを利用した機器構成と
制御情報による出力制御結果

(※)Web モニタリングサービス：　インターネットを介して各ユーザー宅の太陽光発電用 PCS とシャープソーラーモニタリングセンター内の Web モニタリングサーバとを接続し、太陽光発電用 PCS の監視と定期診断を行うサービス

図３－８に示すシステムをシャープ葛城事業所内に構築し、青森サーバからの出力制御情報を Web モニタリングサーバで受信し、同サービスを利用する複数台（本実証事業では 2 台）の太陽光発電用 Intelligent PCS に配信できることを確認した。加えて、太陽光発電用 Intelligent PCS が配信された出力制御情報に従い出力制御を行うことを確認しており、試験結果は良好である。

⑤ 双方向通信出力制御機能を有する太陽光発電用 PCS の開発（三菱電機）

⑤－１　開発

家庭用標準製品（型番 PV-PN30G）をベースに、カレンダ情報を受信するＩ／Ｆ機能を追加し、開発した。主な開発内容を以下に示す。

・外部とのＩ／Ｆは、本事業の共通仕様である RS-485 を採用
・ベースとした製品に RS-485 通信のドライバ、本事業で規定された電文フォーマットおよび通信手順を実装
・双方向通信による出力制御機能を実装。但し、電圧上昇抑制による出力制限機能と内部温度上昇などから PCS を保護するための PCS 機器保護出力制限機能の既存機能を阻害しないこと。

図３－９．PV-PN30G の外観

⑤－２　試験

開発した PCS は、高岳フィールドで評価試験を実施中であり、試験結果は良好である。

⑥ 双方向通信出力制御機能を有する太陽光 PCS（事業用）の開発（高岳製作所）

⑥－１　開発

50kW PCS に、各社共通の仕様を通信機能に組み込み、50kW 事業用太陽光発電用 PCS を開発した。

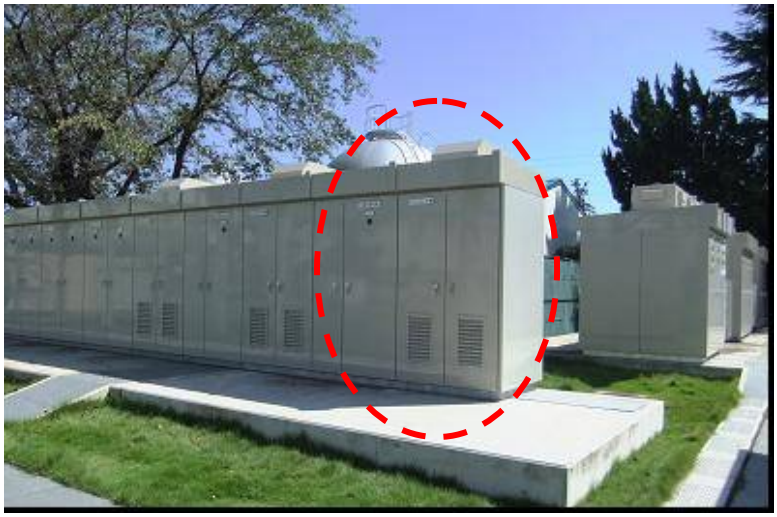


図３－１０．50kW 事業用太陽光発電用 PCS

⑥－２　試験

開発した機器が実系統に接続された場合を想定し、高岳フィールドでの配電ネットワーク試験場にて、開発した 50kW 事業用太陽光発電用 PCS を含めた下記の３つの実証機を設置した。さらに、青森フィールドでのセンターサーバとの双方向通信による出力制御を開始し、データを収集中である。配電ネットワーク試験場における試験状況を図３－１１、システム構成図を図３－１２に示す。

・3～5kW 級家庭用双方向通信機能付き PCS
・50kW 事業用双方向通信機能付き PCS
・3kW、50kW 電圧調整機能付き PCS

試験場全景

家庭用ＰＣＳ設置状況

図３－１１．配電ネットワーク試験場での双方向通信試験状況

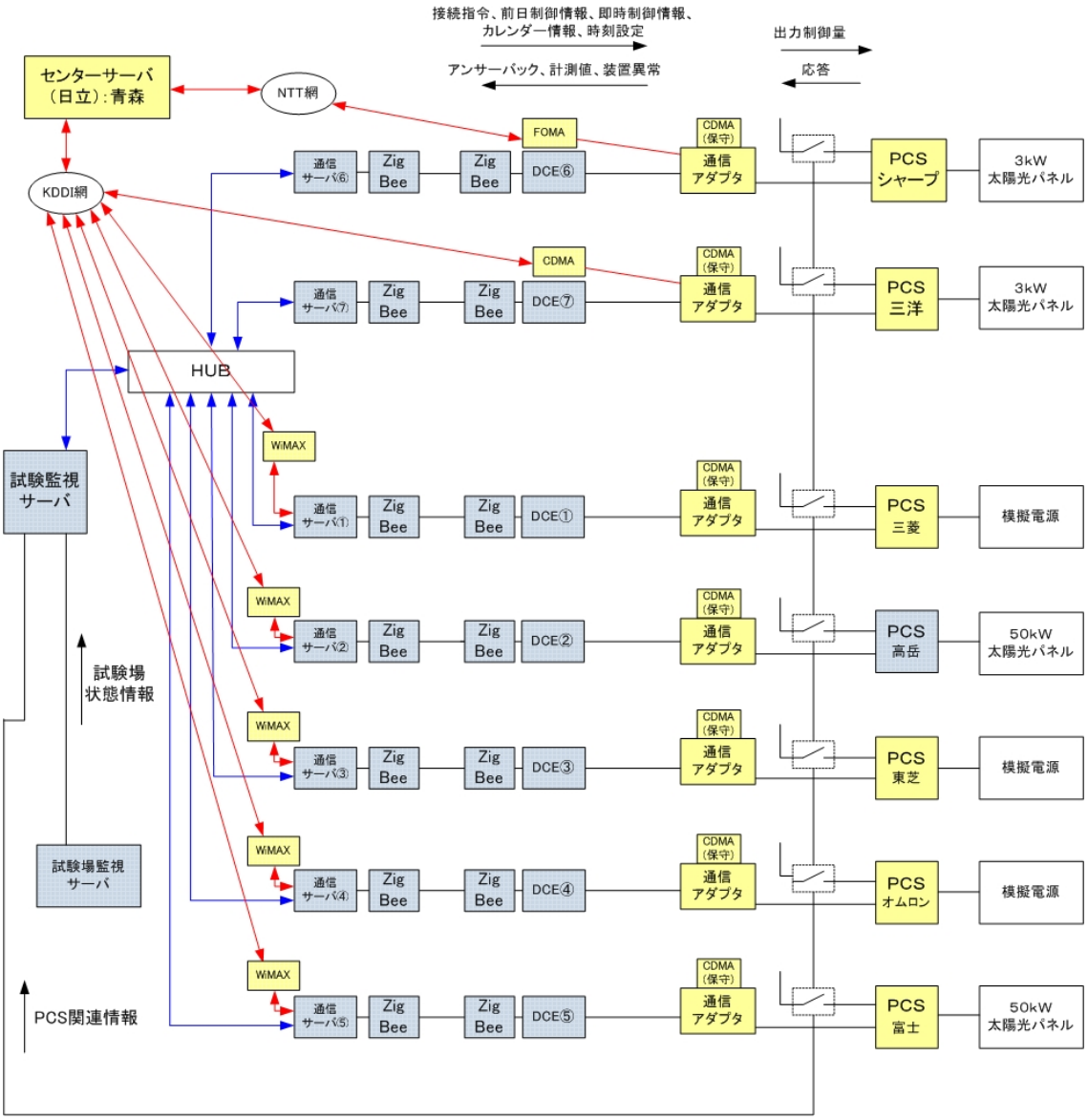


図３－１２．配電ネットワーク試験場でのシステム構成図

⑦ 双方向通信出力制御機能を有する太陽光発電用 PCS の開発（日新電機）

⑦－１　開発

PCS 通信インターフェース共通仕様に基づき、10kW PCS をベースに双方向通信出力制御機能付き PCS を開発した。

共通仕様として策定した Simple PCS を下記に示す。

・上位システムからのカレンダ情報、即時出力制御情報等は通信アダプタ（PCS 外部）が受け取る。

・PCS は通信アダプタからの出力制御指示に基づき、出力制御を行う。

開発した PCS の外観、装置構成、および出力制御性能を図３－１３～図３－１５に示す。

図３－１３．PCS 外観

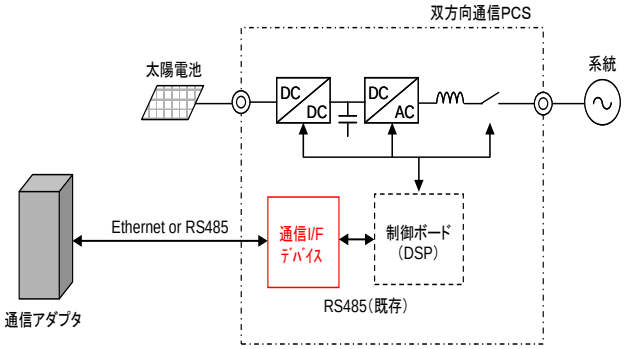


図３－１４．装置構成

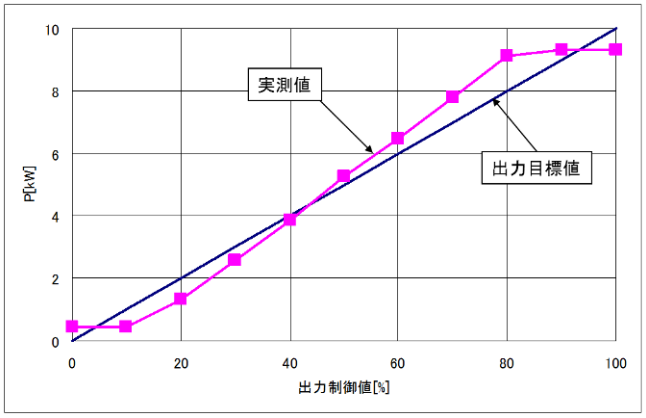


図３－１５．出力制御性能グラフ

⑦－２　試験

開発した PCS を関電工フィールドに設置し通信試験を実施中であり、試験結果は良好である。

（２）通信による出力制御が可能な蓄電池用 PCS

下記の通り、通信による出力制御が可能な蓄電池用 PCS を開発の開発および試験を実施した。

評価指標は、PCS の開発および通信信号により出力制御できることであり、結果として、仕様に基づいた PCS を開発し、試験において確実に出力制御できることがわかり、良好な試験結果を得ることができた。

	参加法人	開発機器	設置場所	試験結果
①	関電工	蓄電池用 PCS	関電工フィールド	良
②	高岳製作所	蓄電池用 PCS	高岳フィールド	良

① 双方向通信出力制御機能を有する蓄電池用 PCS の開発（関電工）

①－１　開発

太陽光余剰電力発生時の需要家内の蓄電池を用いた出力抑制対策、および節電対策が可能なシステム構築を構築するための蓄電・蓄熱･負荷設備を導入し、双方向通信機能を有する蓄電池用 PCS および中央監視システムの開発を行った。加えて、出力抑制回避運用および節電制御に用いるアルゴリズムの開発を行った。

太陽光発電制御：出力抑制回避制御アルゴリズム（蓄電池、給湯用 HP 用）
節電制御：節電制御アルゴリズム(蓄電池、照明、パッケージエアコン用)

表３－２．蓄電池用 PCS の基本仕様

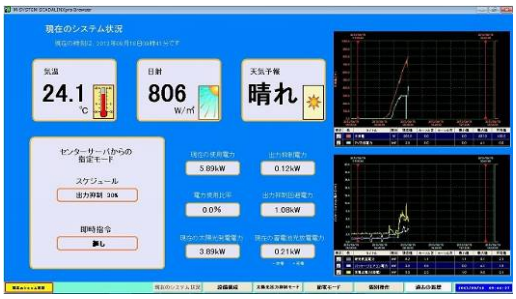
機器	仕様	構成
蓄電池用 PCS	定格容量 5kW	2 台

蓄電池

蓄電池用 PCS

蓄熱設備(給湯用 HP)

負荷設備(照明、パッケージエアコン)



中央監視システム

図３－１６．各種機器導入状況

①－２　試験

導入した設備に対して、中央監視システムからの制御確認試験を行った。

表３－３．機能確認試験結果

対象機器	試験項目	結果
蓄電池	定電流充放電試験	良
	定電力充放電試験	良
空調用HP	スケジュール運転試験	良
給湯用HP	スケジュール運転試験	良
負荷	照明制御試験	良
	空調制御試験	良

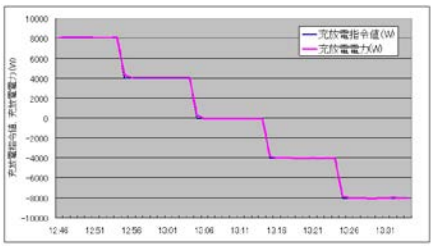


図３－１７．定電力充放電試験

②　双方向通信出力制御機能を有する蓄電池用 PCS の開発（高岳製作所）

②－１　開発

今回開発する PCS は、太陽光発電用 PCS の双方向通信出力制御機能をベースとして、充電時、放電時ともに出力制御指令による出力制御を実施し、電池残存容量の返信（アンサーバック）を行うこととした。

なお、今回は系統設置を想定し、模擬蓄電池 SCADA から出力制御信号を送信し、蓄電池サーバを介して、蓄電池用 PCS の双方向通信制御の動作を確認する。

通信仕様については、太陽光 PCS の双方向通信出力制御に使用する、次世代双方向通信出力制御に係る共通インターフェース仕様に準拠した。

通信データフォーマットは、ECHONET_LITE の中の機器オブジェクト「3.3.14 蓄電池クラス規定」を使用した。

表３－４．蓄電池用 PCS の基本仕様

機器	仕様	構成
蓄電池用 PCS	定格容量 200kW	50kW PCS4 台並列運転

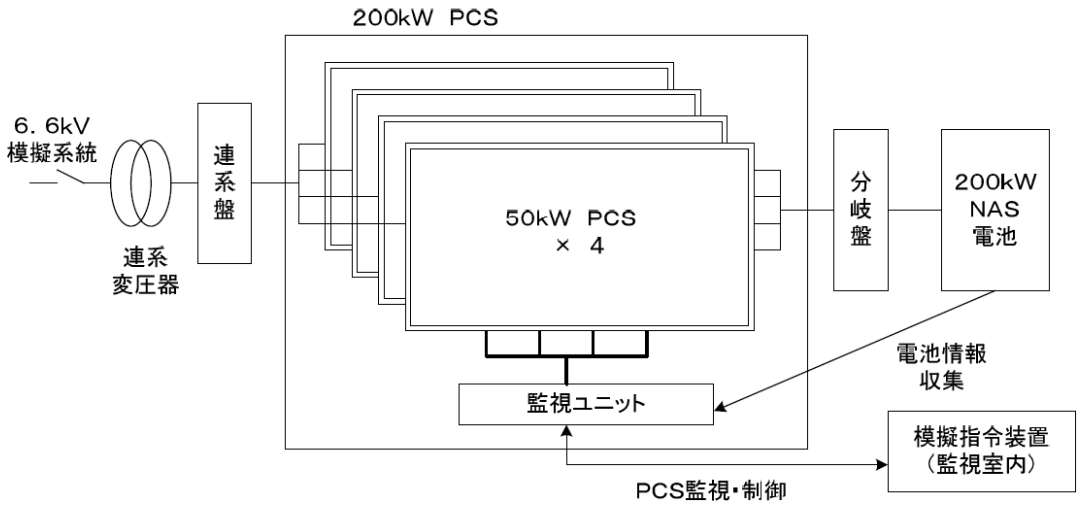


図３－１８．蓄電池用 PCS 主回路構成図

②－２　試験

検証を実施するための実証試験場での通信構成を図３－１９に示す。模擬蓄電池 SCADA を使用して、NAS 電池用 PCS に AFC 模擬信号（AFC 指令値（%））を送信し、有効電力制御を実施中であり、試験結果は良好である。

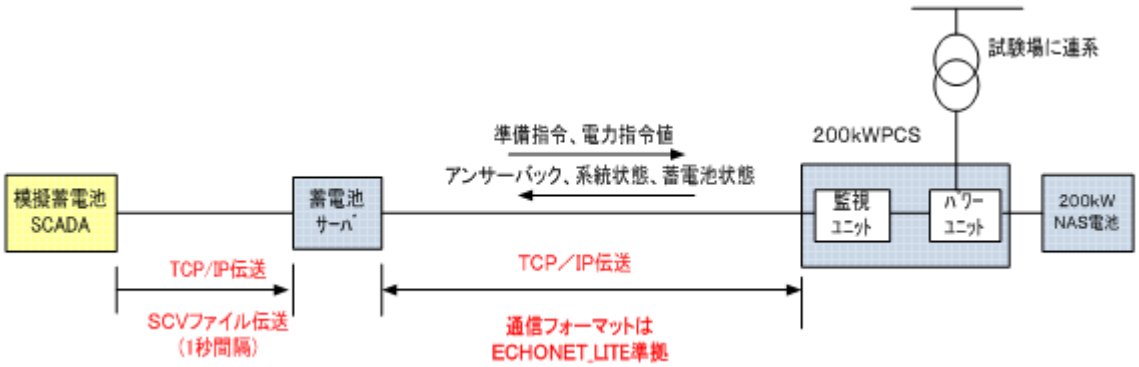


図３－１９．実証試験場での通信構成

200kW NAS 電池用　　200kW NAS 電池
双方向通信出力制御機能付
PCS　図３－２０．実証試験場での設置状況

（３）電圧調整機能付き PCS

下記の通り、電圧調整機能付き PCS を開発し、試験を実施した。

評価指標は、最適な制御方式の選定、PCS の開発および安定的に動作することであり、結果として、制御方式の選定、仕様に基づいた PCS の開発、および機能試験により安定的に動作することの確認を行い、良好な試験結果を得ることができた。

	参加法人	開発機器	設置場所	試験結果
①	東芝	定力率制御方式 PCS	高岳フィールド	良 （工場試験）
②	富士電機	電圧依存型定力率 制御方式 PCS	高岳フィールド	良 （工場試験）

〇電圧調整方法として比較検討する無効電力制御方式は、下記の 4 方式を検討対象とした。

・電圧比例制御

連系点電圧に応じて進み無効電力を出力する。

・電圧一定制御

連系点電圧が上限値を逸脱した場合には、上限値に低下するまで進み無効電力を出力する。

・定力率制御

連系点電圧にかかわらず、ＰＶ出力に応じて一定力率となるよう進み無

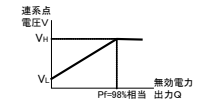
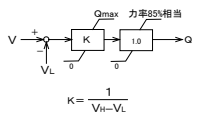
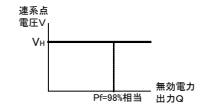
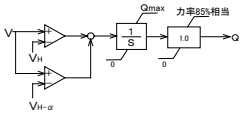
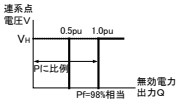
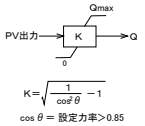
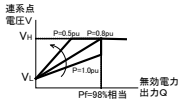
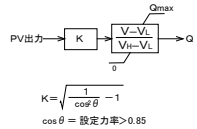
効電力を出力する。

・電圧依存型定力率制御

連系点電圧およびＰＶ出力に応じて、連系点電圧が高いほど低い力率となるよう進み無効電力を出力する。（電圧に応じて力率を変化）

上記 4 方式について比較検討した結果を表３－５に示す。制御設計方針に基づき評価した結果、定力率制御と電圧依存型定力率制御方式の 2 方式を実証器に採用することとした。

表３－５．無効電力制御の比較結果

	電圧比例制御方式	電圧一定制御方式	定力率制御方式	電圧依存型定力率制御方式
動作特性・原理	 連系点電圧に比例して進み無効電力を出力する。  $K=\frac{1}{V_H-V_L}$	 連系点電圧が上限値を逸脱した場合には、上限値に低下するまで進み無効電力を増加出力させる 	 連系点電圧に関わらずPV出力に比例して進み無効電力を出力する  $K=\sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta}-1}$ $\cos\theta$ ＝ 設定力率>0.85	 PV出力に比例し、かつ連系点電圧に比例して進み無効電力を出力する  $K=\sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta}-1}$ $\cos\theta$ ＝ 設定力率>0.85
逸失発電電力（出力抑制量）	△	△	◎	◎
電圧上昇抑制効果	◎	△	◎	◎
タップ動作回数低減	◎	△	◎	◎
配電線損失	○	◎	△	○
LRTタップへの影響	△	△	◎	△
実証器に採用	―――	―――	○	○

○電圧調整機能付き PCS の試験法の検討

試験法を検討し、以下の通り決定した。

・高圧 PCS の電圧補償機能の検証試験（三相 3 線 400V）

(a) 定力率制御 PCS 模擬 NAS 電池の出力上昇（発電電力増）に伴い発生する電圧上昇の抑制効果検証

(b) 設定電圧下限値をパラメータとして供試 PCS の動作状況を確認（出力抑制を伴わない場合）

(c) 設定電圧下限値をパラメータとして供試 PCS の動作状況を確認（出力抑制を伴う場合）

(d) 系統側要因（LRT 動作）で発生する電圧変動に対する供試 PCS の動作状況を確認

(e) 定力率制御 PCS 模擬 NAS 電池の出力急変により発生する電圧変動に対する供試 PCS の動作状況を確認

・高圧 PCS、低圧 PCS 混在系統での電圧補償機能の検証試験

(a) 定力率制御 PCS 模擬 NAS 電池の出力上昇（発電電力増）に伴い発生する電圧上昇の抑制効果検証

(b) 設定電圧下限値をパラメータとして供試 PCS の動作状況を確認（出力抑制を伴わない場合）

(c) 設定電圧下限値をパラメータとして供試 PCS の動作状況を確認（出力抑制を伴う場合）

(d) 系統側要因（LRT 動作）で発生する電圧変動に対する供試 PCS の動作状況を確認

① 電圧調整機能付き PCS の開発と試験評価（東芝）

①－１ 開発

住宅用 PCS の電圧調整機能において、太陽光発電が大量導入された時に生じる電圧変動を抑制するために必要な対策技術を検討した。

系統電圧の適正値を逸脱した時の住宅用 PCS の自律的電圧制御のための制御方式について検討した結果、制御内容がシンプルかつシミュレーションにおいても良好な結果が得られた「定力率制御方式」機能を持った住宅用 PCS を開発した。

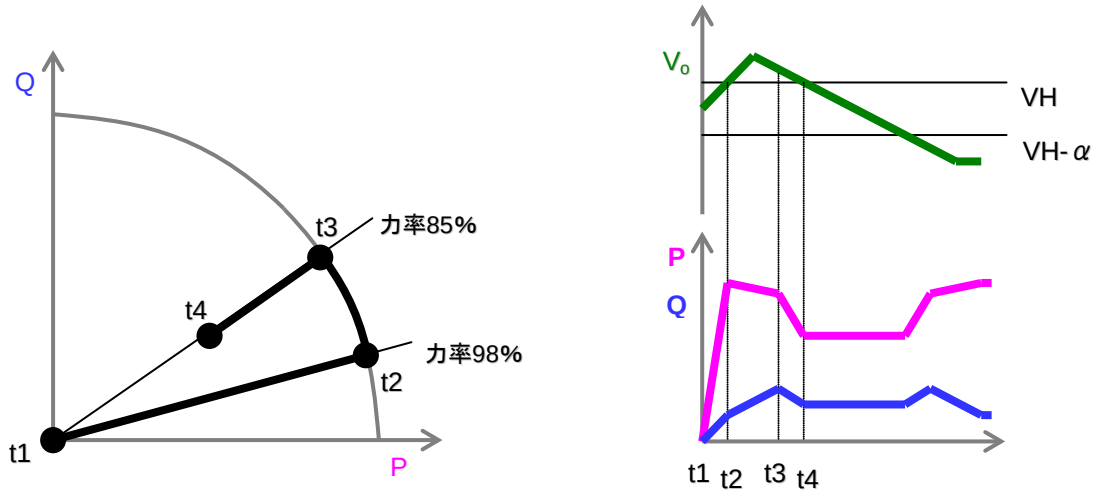


図３－２１．PCS の動作

①－２　試験

開発した PCS の電圧調整に関する動作・効果について工場試験を実施し、良好な結果を得られた。工場試験の実施項目は以下の通り。

・ハードウェア試験
・特性試験
・設定値変更試験
・設定値測定試験
・総合動作試験

また、高岳フィールドに設置した PCS の設置状況を図３－２２に示す。今後は、系統側の条件を変えた動作試験を実施していく。

図３－２２．PCS の設置状況

② 電圧調整機能付き PCS の開発と試験評価（富士電機）

②－１　開発

今回開発した PCS を図３－２３に示す。標準 PCS、通信ﾃﾞﾊﾞｲｽ(ｼｰｹﾝｻ)、POD、MTD より構成される。

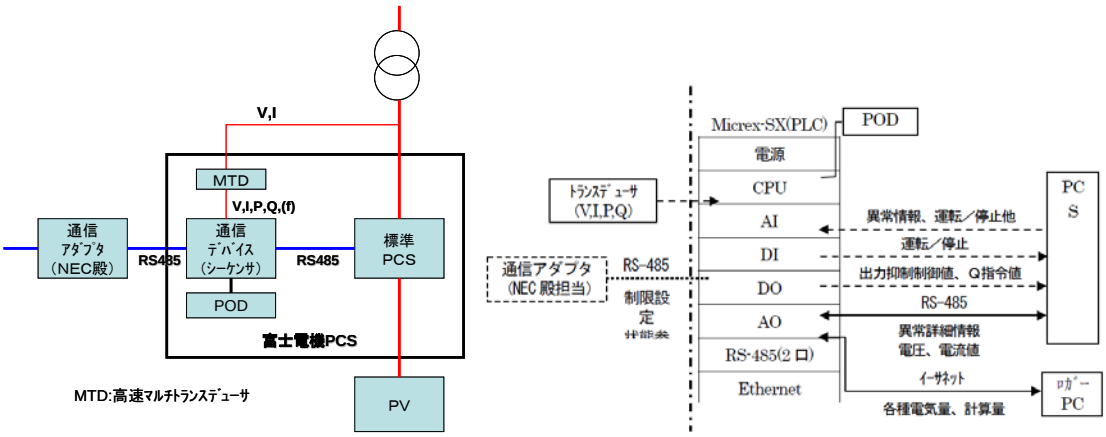


図３－２３．システム構成図

具備する機能は以下の通り。

・PV- PCS 機能
・系統連系機能
・通信アダプタとの通信機能
・通信アダプタ経由の信号による出力抑制機能
・PCS 状態監視/状況通知
・POD（ﾃﾞｨｽﾌﾟﾚｲ装置）による状態監視/制御機能
・各種データ計測/ロギング機能

POD：各種整定値の設定、PCS、SX の状態表示、計測値表示を行う。
Micrex－SX：通信アダプタからの指令により PCS 状態情報、計測情報を返信する。PCS に対する出力抑制指令値を受信し、PCS の出力制御を行う。トランスデューサーからの P、V 等の電気量、POD からの各種整定値を使用し、PCS に対する Q 指令、出力抑制指令値を算出、出力（4-20mA）し、連系点電圧上昇を抑制させる。
ロガーPC：計測値、演算値等を SX より収集する。

②－２　試験

開発した PCS において、下記の工場試験を実施した。

・ハードウェア試験
・通信アダプタとの通信機能試験
・PCS 運転/停止動作試験
・PCS 状態表示試験
・出力抑制試験

高岳フィールド内の配電ネットワーク試験場に、50kW 事業用双方向通信機能付き PCS の設置を完了し（図３－２４参照）、センターサーバ～通信サーバ～通信アダプタ～当社 PCS 間で、出力抑制制御が実行されることを確認した。現在、送受信データ状況を検証中である。引き続き、詳細試験を行い通信制御による出力抑制制御機能の評価を実施する予定である。また、電圧調整機能の実証試験を配電ネットワーク試験場において開始しており、現在 1 回目の実証試験結果を取り纏め中である。

今後、通信制御による出力抑制制御機能、および無効電力制御による電圧上昇抑制効果の評価を実施する予定である。

図３－２４．50kW 事業用双方向通信機能付き PCS

（４）双方向通信機器

下記の通り、双方向通信機器を開発し各フィールドにて通信試験を実施した。

評価指標は、双方向通信機器の開発および開発機器の安定的かつ確実な動作であり、各フィールドにおいて、パケットエラー率（PER）や通信成功率にて評価を行い、良好な結果を得ることができた。

	参加法人	開発機器	設置場所	試験結果
①	三菱電機	900MHz 帯特小無線	自社フィールド	良
②	パナソニックシステムネットワークス	900MHz 帯特小無線 2.4GHz 帯無線 LAN	自社フィールド	良
③	富士通	2.4GHz 帯無線 LAN	自社フィールド	良
④	関電工	PCS 出力制御システム	関電工フィールド	良
⑤	日立製作所	試験用無線端末 センターサーバ	青森フィールド	良
⑥	東芝	900MHz 帯特小無線	青森フィールド	良
⑦	沖電気工業	900MHz 帯特小無線	青森フィールド	良
⑧	住友電気工業	電力線通信（PLC）	青森フィールド 高岳フィールド	良
⑨	日本電気	通信アダプタ	青森フィールド 関電工フィールド 高岳フィールド	良
⑩	日本アイー・ビー・エム	インターネットで動作する汎用通信ソフトウェア	青森フィールド	良
⑪	ＫＤＤＩ	広域サービス網を利用した通信ネットワーク	青森フィールド 関電工フィールド 高岳フィールド	良
⑫	ＮＴＴドコモ	広域サービス網を利用した通信ネットワーク	青森フィールド 関電工フィールド 高岳フィールド	良

① ローカル通信網（特小無線）による双方向通信試験（三菱電機）

カレンダ情報を送信するための通信手段として、900MHz 帯の特小無線を実建物設備において通信性能を測定し、実用性の評価を行った。

①－１　開発

900MHz 帯特小無線の測定・評価を行うための測定、および評価ツールを開発した。

・測定ツールの開発

送信側の PC より測定開始指示をすると自動的にテストパケットを受信側に送信し、パケットを受信するとともに電界強度の測定を行う。測定終了後、受信側の通信ユニットに蓄積された測定結果をデータ収集用 PC で収集する。これにより、測定員の電波干渉を防ぐとともに、省力化が可能となった。

・測定結果の例

測定ツールの構成を図３－２５に示す。

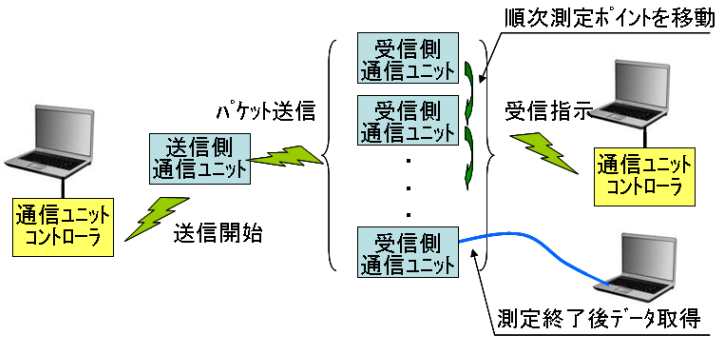


図３－２５．測定ツールの構成

①－２　試験

10 箇所の実建物にて測定し評価を行った。測定は、外部から宅内への情報伝達を想定して、スマートメータの設置箇所（外壁やパイプシャフトなど）を送信点とし、宅内の様々な箇所との通信性能を測定した。

実建物は、木造モルタル構造の戸建て 6 箇所（内、寒冷地区 2 箇所）、コンクリート構造戸建て 2 箇所、コンクリート構造集合住宅 2 箇所で測定を行い、外壁の断熱材、床暖房設備などの影響で電波強度（以下 RSSI）の減衰がみられ、送信点より遠い箇所で一部のパケットロスが観測されたが、殆どの箇所で良好な通信性能が得られた。この結果から、一般的な家屋では、900MHz 帯特小無線が、宅外から宅内への通信手段として有効であると判断することができた。

測定の状況について、木造モルタル構造の戸建て住宅の測定例を図３－２６に示す。左図が、１階部分、右図が２階部分で、TX1（星印、建物外壁）を送信点とし、宅内の各点（〇印）を受信点とした。

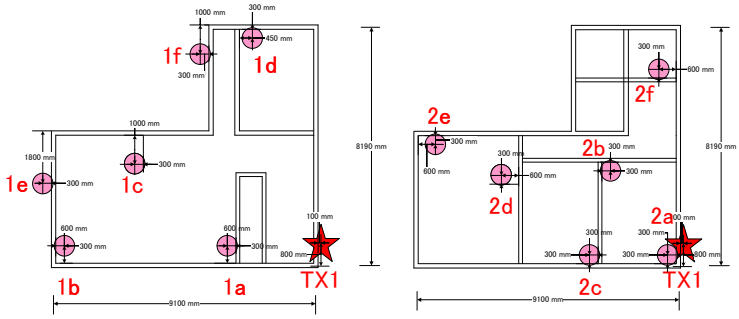


図３－２６．戸建て住宅の測定例

図３－２７が測定結果で、送信側の通信ユニットは、アンテナ２本で構成しており、青線が送信側のアンテナ１で送信した場合の RSSI、赤線がアンテナ２で送信した場合の RSSI を示しており、１箇所 RSSI が低い箇所があるが、通信性能を確保できる-50dBm から-70dBm の範囲におさまっている。また、エンジ線と緑線は、PER を示しているが、RSSI の低い箇所も含めて PER が 0 となり良好な結果が得られている。

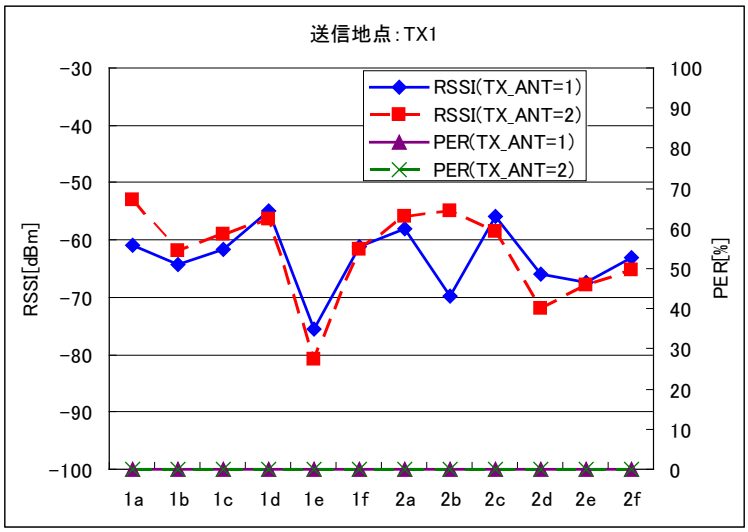


図３－２７．戸建て住宅の測定結果

② ローカル通信網（特小無線および無線 LAN）による双方向通信試験（パナソニックシステムネットワークス）

②－１　開発

電力系統と需要家を結ぶ双方向通信手段のうち、ローカルに通信網を形成するための通信手段として、特小 920MHz 帯無線機および無線 LAN（2.4GHz）伝送装置を開発した。周波数再編により新規割当となった 920MHz 帯に対応した特小無線機のハードウェア試作開発および PCS のデータ収集、状態取得、機器制御を行う１対 N およびマルチホップに対応した通信方式の開発を実施し、加えて無線管理サーバの開発を実施した。

図３－２８．特小 920MHz 帯無線機

図３－２９．無線 LAN 伝送装置

②－２　試験

(a) 特小 920MHz 帯無線機および無線 LAN 伝送装置の伝搬評価

宅内への伝搬および、屋外でのコンクリート建物の見通し外を含む伝搬評価を実施した。

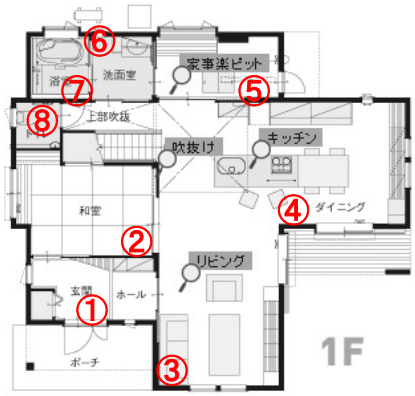


図３－３０．宅内伝搬環境（別途 2F）

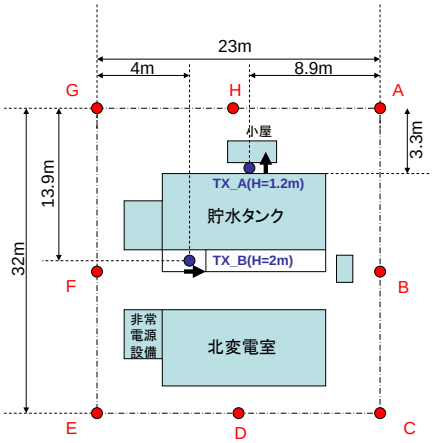


図３－３１．屋外伝搬環境

・宅内伝搬では建物外からの送信点 3 箇所、受信点 15 箇所で RSSI、PER を測定し、920MHz は PER 0～0.1%、無線 LAN は 1Mbps で PER 0%、 11Mbps で PER 0～0.82%であった。

→　宅内伝搬では、920MHz 帯無線、無線 LAN 共に良好な通信結果が得ら

れた。

・屋外伝搬では送信点 2 箇所、受信点 9 箇所で RSSI、PER を測定し、920MHz は PER 0～3%、無線 LAN は 1Mbps で PER 0～95%、11Mbps で PER 0～100%であった。
→　屋外伝搬では、920MHz 帯無線においては良好な結果が得られたが、無線 LAN においては見通し外通信の場合には直接通信の難しいエリアが多くなり、密集したエリアでの利用や中継器の追加などが必要となってくると考えられる。

(b) 様々なトポロジー構成におけるデータ伝送性能評価

1 対 N、マルチホップのトポロジーに対してブロードキャストおよびユニキャストのデータ伝送を行い、応答時間の測定結果を評価。※ブロードキャストは全データの応答完了時間

構成　１：N　　構成　マルチホップ（7 段）

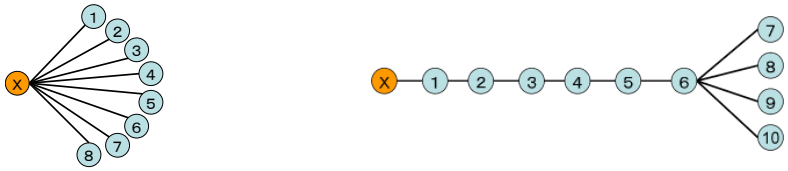


図３－３２．トポロジーの構成

・応答時間に関する結果　特小 920MHz が約 500ms～4s
無線 LAN が約 20ms～500ms
・特小 920MHz に関しては、見通し外通信でのエリア構成が行いやすい特性があるが、応答時間のホップ段数による増加が大きく、ホップ数を削減するトポロジー制御が重要と考える。

表３－６．応答時間の測定結果

（単位：ms）

試験構成	試験内容	特小920MHz	無線LAN
1:N	ユニキャスト	518.7	21.5
	マルチキャスト	550.2	445.7
マルチホップ（7段）	ユニキャスト	最上段　932.5	最上段　28.5
		最下段　3,698.1	最下段　43.6
	マルチキャスト	最上段　652.0	最上段　45.2
		最下段　4,112.5	最下段　557.7

③ ローカル通信網（大規模マルチホップ通信（無線 LAN））による双方向通信試験（富士通）

③－１　開発

アドホック方式を用いて太陽光発電用 PCS の出力制御を目的とした 2.4GHz 無線 LAN の双方向通信網（以下、無線 LAN マルチホップネットワーク）を構築した。

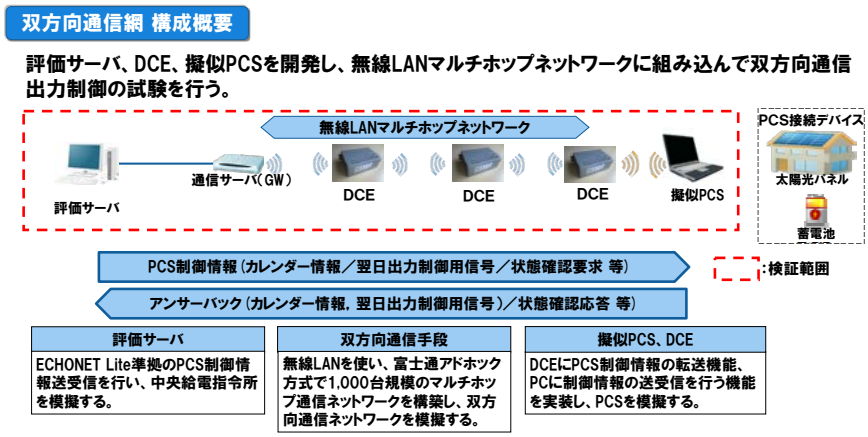


図３－３３．双方向通信網構成概要

(a) 評価サーバ、疑似 PCS の開発

ECHONET-Lite 準拠の電文（PCS 制御情報）を生成し、無線 LAN マルチホップネットワークの電文にのせて送受信する機能を開発した。動作環境は Windows7 である。動作画面を図３－３４、図３－３５に示す。

(b) DCE の開発

ハードウェアは既設の無線 LAN マルチホップネットワークで稼動しているものを元に開発し、ソフトウェア（ファームウェア）は本実証実験に必要な機能（ECHONET-Lite 対応など）を追加した。機器の外観を図３－３６に示す。

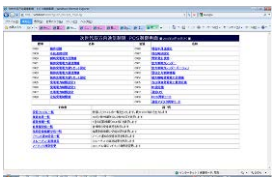


図３－３４．評価サーバ動作画面

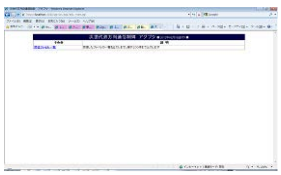


図３－３５．疑似 PCS 動作画面

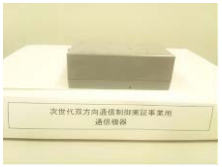


図３－３６．DCE の外観

③－２　試験

遠隔からのPCS制御が確実に行えることの検証と性能評価のための試験を実施した。

(a)無線LANマルチホップネットワーク（通信サーバ～DCE間）の通信性能測定

評価サーバから疑似PCSに対して測定条件を変えてデータを送信し、応答時間と通信成功率の平均値を測定した。測定条件は以下の通り。

通常試験：カレンダ情報、翌日出力制御情報、状態確認要求の3種類を20秒/回で送信

加速試験：通常試験と同じPCS制御電文を15秒/回、10秒/回、7秒/回で送信

負荷試験：10秒/回で1024byte、2048byte、4096byteのデータを送信

測定した結果、平均応答時間は通常試験と加速試験で差は無く、ともに0.1～0.4秒とHOP数の増加に比例して長くなった。負荷試験では1024byteと2048byteの時は両方とも1.5秒、4096byteでは2.1秒に増加した。平均通信成功率は全ての試験で99.5%以上となり、問題なくデータを送受信できることを確認した。

(b)無線LANマルチホップネットワークと900MHz帯無線マルチホップネットワークの性能評価基礎データ収集と両者の比較評価

900MHz帯無線マルチホップネットワークと無線LANマルチホップネットワークにおいて、通信サーバ(GW)とDCE間でデータ通信を行い、応答時間と通信成功率の平均値を測定した。

結果、平均応答時間はHOP数別に見ると900MHz帯無線マルチホップネットワークが2.4GHz無線LANマルチホップネットワークの約10倍大きい値となり（5HOPの時900MHzが1,846msec、2.4GHzが181msec)、それぞれの通信速度に応じた結果となった。平均通信成功率は98.4～99.9%となり、問題なくデータを送受信できることを確認した。

(c)実フィールドに近い環境下での出力制御情報の応答率測定と測定結果に対する環境(天候、気温等)の影響評価

オフィス2階に評価用サーバ､オフィス外周にDCEと疑似PCSを設置し、評価用サーバから疑似PCSに対して定期的に8種類のPCS制御信号を送信して通信成功率の平均値を測定し、測定結果と環境データ（最高気温、降水量、平均湿度）の間の相関有無を分析した。

結果、平均応答率は98.1～100%であった。また、PCS制御信号全種類の平均通信成功率と、最高気温、降水量、平均湿度それぞれの相関の有無について回帰分析を行った結果、直線回帰を確認する決定係数R^2の値は全て0.06以下となり、相関が低いことを示す結果となった。

④ 実建物設備を用いた双方向通信試験（関電工）

④－１　開発

関電工フィールドにて、一般的なビルに太陽光発電設備が設置されることを想定し、設置形態別に太陽光発電用 PCS の出力制御を目的とした双方向通信試験設備および制御システムを構築した。また、双方向通信に用いる電文の開発を行った。

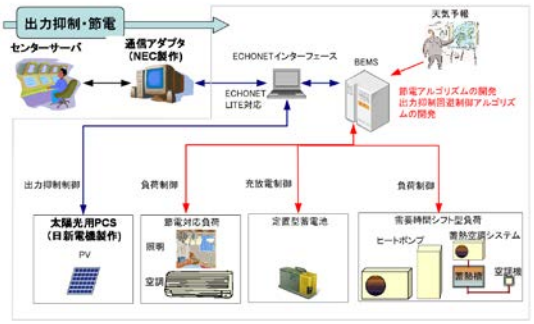


図３－３７．システム概要

図３－３８．制御システム

④－２　試験

(a) 双方向通信試験

センターサーバからの指令を模擬した通信確認試験を実施した。

・通信アダプターPCS 間通信確認試験

試験内容	試験実施日	試験項目数	結果
電文送信試験 （太陽光発電制御）	2012/11/21	22 項目	良

・通信アダプター制御システム間通信試験

試験内容	試験実施日	試験項目数	結果
電文送信試験 （太陽光発電制御）	2013/1/21	10 項目	良
電文送信試験 （節電制御）	2013/1/21	11 項目	良
電文送信試験 （蓄電池制御）	2013/1/21	11 項目	良

(b) 実証試験

システム構築および電文の開発を用い、システム制御の実証試験を行った。また、需要家に設置された蓄電池を想定した双方向通信による実証試験を行い、太陽光発電電力の有効活用を検討・検証した。

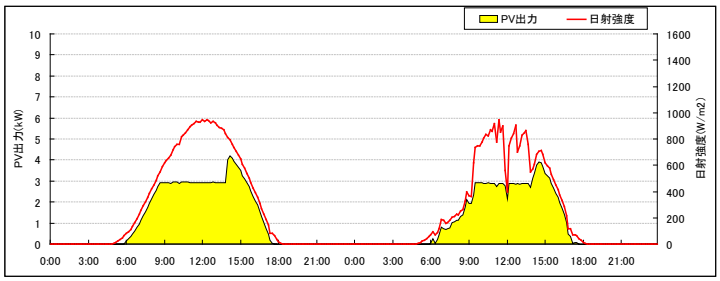


図３－３９．出力抑制試験

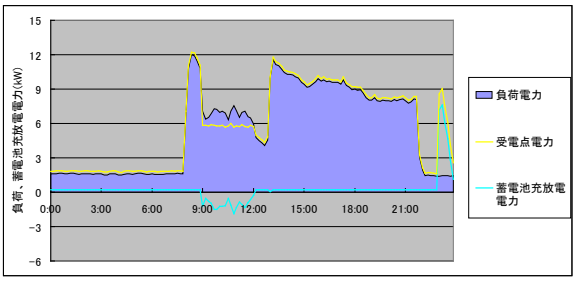


図３－４０．節電試験

⑤ 青森フィールドにおける実証試験（日立製作所）

⑤－１　開発

青森フィールドにおいて通信実証試験を行うための 21 台(特定小電力無線 5 台、CDMA 携帯無線 6 台、FOMA 携帯無線 5 台、WiMAX 無線 5 台)の無線端末を開発した。また、共通試験においてユースケースを実行可能なセンターサーバを開発した。

⑤－２　試験

PCS 出力制御を行うための双方向通信システムに関し、通年のロングラン試験による通信性能評価を目的とした。2012 年 12 月から 2013 年 11 月の 1 年間を季節毎に 4 期に分けて試験を行う予定で、冬、春、夏の 3 期まで試験を完了した。各期は 3 ヶ月あり、月毎に共通シナリオ 1、共通シナリオ 2、個別試験を行った。共通シナリオ 1 では出力制御カレンダによる制御用の通信、シナリオ 2 では翌日出力制御による制御用の通信に関する評価を行った。個別試験では通信メディアの特性を評価した。

表３－７．実証スケジュール

試験区分	H24	H25										
	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
シナリオ1												
シナリオ2												
個別試験												

・シナリオ１：出力制御カレンダ更新による PCS 出力制御

PCS 出力制御が、PCS 出力制御用通信網の本格的な構築よりも早期に必要となった場合を想定したシナリオである。年に１回程度、数週間をかけて当年と翌年の出力制御カレンダ情報（年間の特異日の出力制御情報を格納)を設定する。

・シナリオ 2：翌日（当日）出力制御情報による PCS 制御

PCS 出力制御用通信網が、PCS 出力制御が必要とされる時期よりも早期に本格的に構築された場合を想定したシナリオである。毎日、翌日の出力制御の要否を判定し、必要であれば翌日の出力制御情報を設定する。また、当日内の出力制御も可能とする。

(a) 通信実証試験

共通試験では、シナリオ毎のユースケースに対応する電文の到達率や応答速度を測定した。個別試験では、無線電波の伝搬特性を測定した。

図３－４１は、共通試験における通信メディア毎の応答速度を示す。920MHz 無線の応答は速く、携帯電話はリンク確立に時間がかかるが、メディアによらずほぼ 100%の到達を確認した。図３－４２は、個別試験における特定小電力無線の電波伝搬特性を示す。周波数が低い 429MHz 無線は回り込み効果があり、障害物のある環境でも遠方まで伝搬する。いずれも、季節による差異は計測されなかった。

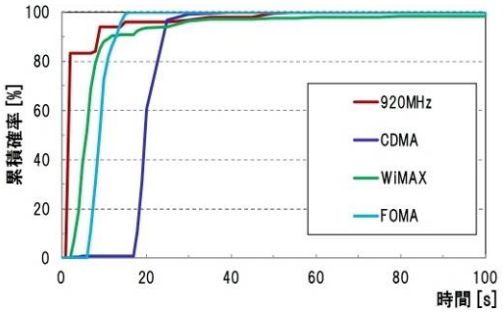


図３－４１．共通試験の応答速度比較

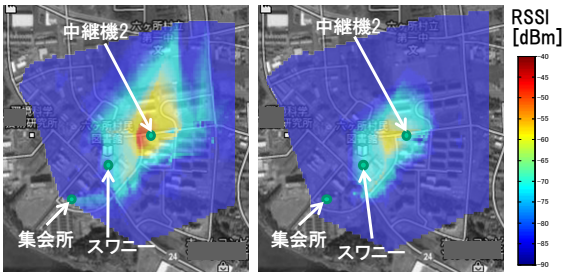


図３－４２．個別試験の電波伝搬特性

(b) センターサーバ動作試験

共通試験においてセンターサーバからユースケースを実行し、各通信サーバとの通信電文ログを取得し、制御応答特性を測定した。

青森フィールドの全端末について、590 秒以内での制御応答を確認した。

⑥ 900MHz 帯特定小電力無線（1mW タイプ）を用いた双方向通信の開発・試験（東芝）

⑥－１　開発

青森フィールドにおける検証を行う通信媒体のうち、900MHz 無線マルチホップについて、電波出力が 1mW のタイプの機能および性能検証を行うための通信サーバ、コンセントレータ、屋外通信装置、屋内通信装置の各通信装置を開発した。

⑥－２　試験

900MHz 無線マルチホップ技術が将来のスマートメータ通信インフラの一つとして採用された場合に、屋内の PCS に接続された通信装置へ同じ通信技術で接続することを想定したネットワーク構成としている。青森フィールドにおける検証でのネットワーク機器構成図を図３－４３に示す。事前の無線伝搬環境調査などの結果から各装置の設置箇所を決定後に、村内の計 33 カ所に各装置を設置して 2012 年 12 月より検証を行っている。

青森フィールド内の無線ネットワークは、2 カ所の電柱上に設置されたコンセントレータを中心に構成され、状況によりマルチホップ状態を変化させつつ、安定した通信を行える状態となっている。センターサーバと屋内通信装置との双方向通信については、住民の方の転居に伴う停電の影響を除き、個別試験期間（2 月、5 月、8 月）を除く期間においてセンターサーバからの要求に対してほぼ 100%の通信成功となっている。

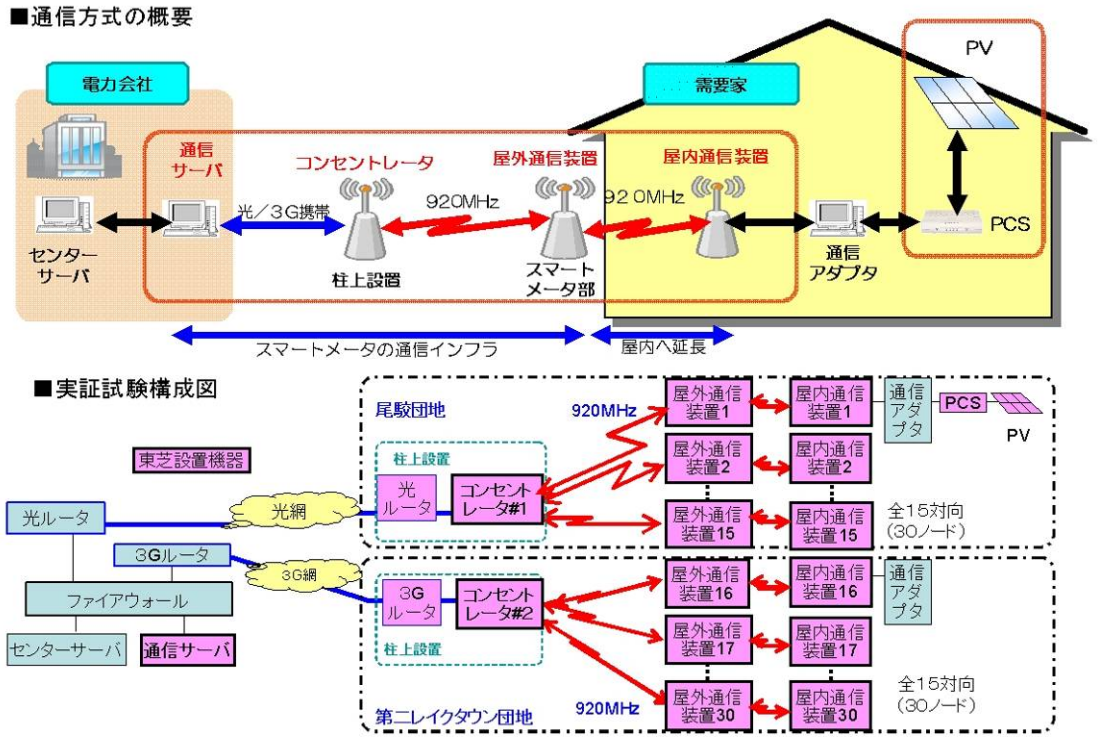


図３－４３．実証試験構成図

⑦ 900MHz 帯特定小電力無線（10mW タイプ）を用いた双方向通信の開発、センターサーバとの双方向通信試験（沖電気工業）

⑦－１　開発

開発システムは、センターサーバと通信アダプタ間の 920MHz 帯無線マルチホップシステム（出力 20mW）の管理・制御を行う通信サーバ、マルチホップ通信を行い通信サーバへ電文を受け渡すコンセントレータ、および、各エリアを接続するための中継器、家庭に設置され、基地局無線機とマルチホップ通信を行い、通信アダプタ間でデータの送受信を行う DCE で構成される。

⑦－２　試験

青森フィールドにこれらの機器を設置し、屋外及び居住環境における試験を実施中である。

実験の結果、通信成功率は 99%以上となっており、出力制御に用いることが可能と判断している。今後、長期間の連続試験によって無線環境の変動に関するデータを取得していく予定である。

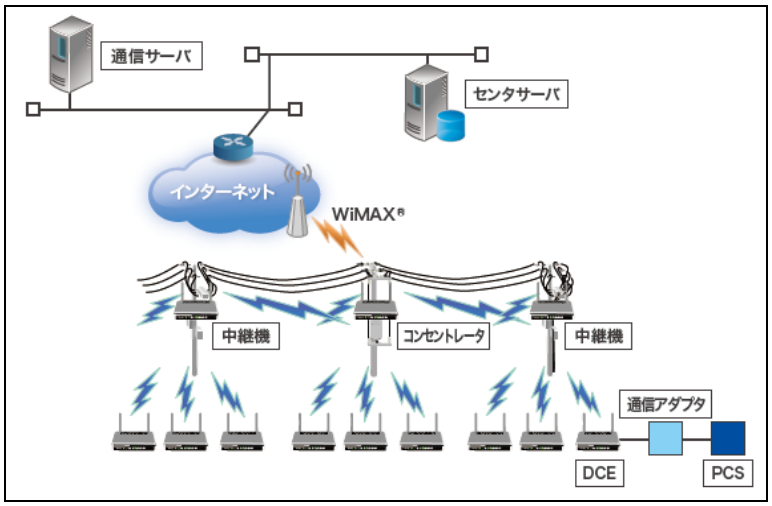


図３－４４．システム構成

図３－４５．開発した無線機

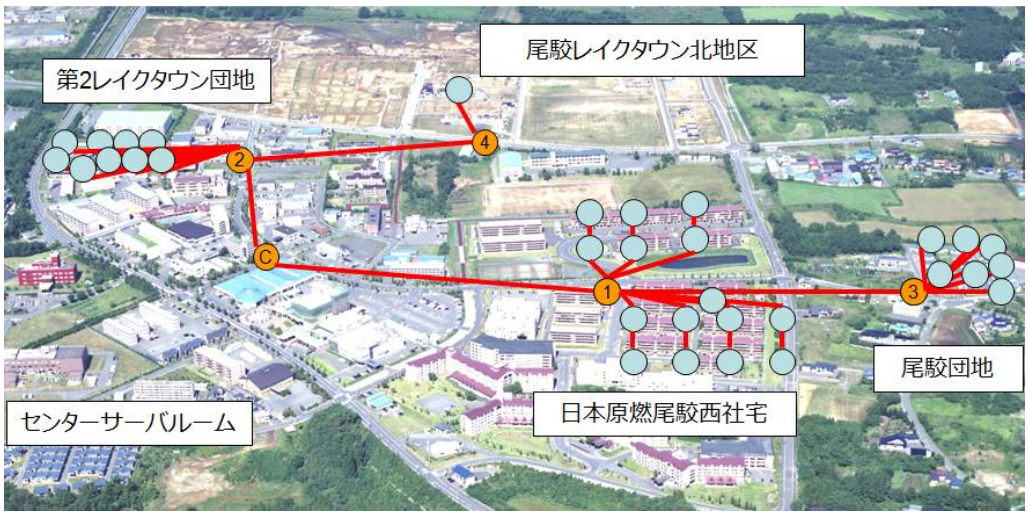
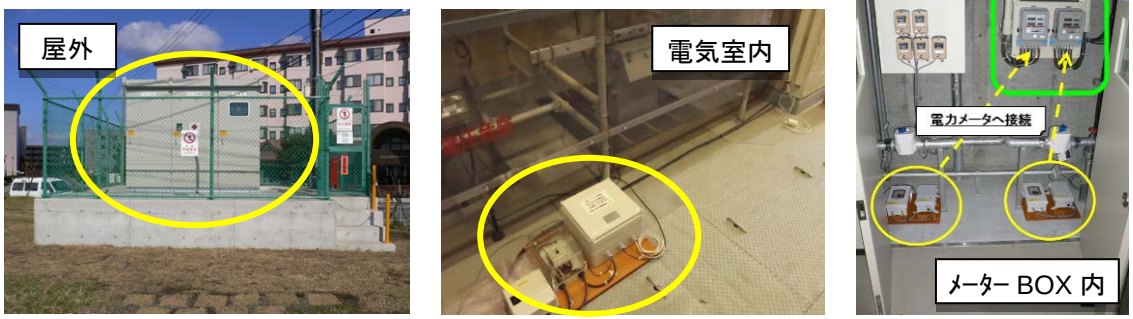


図３－４６．青森フィールドにおける機器の設置状況
（青が DCE、橙がコンセントレータ、中継機を示す、赤線は転送経路の一例）

⑧ 電力線通信（PLC）を用いた双方向通信の開発・試験（住友電気工業）

⑧－１　開発

電力会社の配電線を通信路とする通信方式（PLC：Power Line Communication）として、TWACS 方式と G3 方式の 2 方式の PLC 通信装置の開発と現地への機器設置を行った。（図３－４７、図３－４８参照）



〈TWACS 方式 PLC 親装置〉　〈G3 方式 PLC 親装置〉　〈PLC 子機（DCE）〉

図３－４７．PLC 通信装置の設置状況

図３－４８．通信実証システム構成

⑧－２　試験

平成 24 年 12 月より青森フィールドでの通信実証を開始した。平成 25 年 7 月までの通信実証での PLC 区間の通信成功率を表３－８に示す。TWACS、G3 の両方式とも通信成功率 99.8%以上の結果であり、上位通信レイヤの再送手順と組み合わせて、信頼性の高い通信システムを構築可能である。

表３－８．PLC 双方向通信実証の結果

PLC 方式	月	PCS 制御 シナリオ	PLC 区間の 通信成功率[%]
TWACS 方式	12	シナリオ１	100.0
	1	シナリオ２	99.98
	3	シナリオ１	99.85
	4	シナリオ２	100.0
	6	シナリオ１	99.95
	7	シナリオ２	100.0
G3 方式	12	シナリオ１	100.0
	1	シナリオ２	99.98
	3	シナリオ１	99.87
	4	シナリオ２	99.92
	6	シナリオ１	99.87
	7	シナリオ２	99.95

⑨ 実建物設備及び実証試験場を用いた双方向通信試験と通信アダプタの開発
（日本電気）

⑨－１　開発

通信機能付き PCS を、複数存在する双方向通信手段を用いて接続可能とする、通信アダプタ装置を開発した。通信アダプタ装置のシステム構成、得られた成果について以下に示す。

区間	局内/局間	ＷＡＮ通信手順		アダプタ	PCS通信手順	
出力制御手順	WAN側通信手順 （専用ヘッダ+ECHONET Lite 電文形式）			制御手順の終端機能	PCS通信手順 （PCS-アダプタ共通手順）	
トランスポート層以下	サーバ間通信	WAN	DCE通信媒体	ネットワーク終端機能	PCS通信媒体	
	IP	独自	調歩同期 IP		UDP/IP	調歩同期
	Local接続 広域網など	WAN通信メディア	RS-485 Ethernet		Ethernet	RS-485

図３－４９．通信アダプタにおけるプロトコルスタックとシステム構成

・通信アダプタ装置の開発と PCS 間の通信手順を標準化

実証参画 PCS メーカとともに「PCS-通信アダプタ」間の通信プロトコルを標準化した。PCS により異なっていた通信手順を標準化することで、制御機器の標準化・共通化を実現。WAN 側通信のネットワーク終端はもとより、PCS を補完する機能である、制御カレンダの保持、セキュリティ面の担保など PCS へ抑制制御を行うゲートウェイ装置の必要性を、本開発を通じて検証した。

⑨－２　試験

実証機器の実環境フィールドとして青森フィールド、法人内実験フィールドとして高岳フィールド、関電工フィールドの 2 か所、計 3 拠点で実証を行った。

・実証フィールドでの通信アダプタ装置の評価

3 拠点合わせ、計 20 台を設置し、実験場や実住環境など PCS 制御を行う上での課題や手法を検証した。特に、青森フィールドでは個宅 2 軒へ設置し、監視・制御の確実性を検証した。住民が生活する中での生活パターンや、それらを加味した抑制タイミングの検証・必要性、装置サイズや設置場所の検証を行った。本装置を活用することで、抑制制御日における PCS への制御成功率は 100%を実現した。

図３－５０．NEC 製通信アダプタ装置（試作機）

図３－５１．電気設備室への設置事例

⑩ 双方向通信を実現する上位インターフェース仕様の共通化と、その汎用通信ソフトウェアの開発および双方向通信を実現する汎用通信ソフトウェアの試験（日本アイー・ビー・エム）

⑩－１　開発

太陽光の出力制御は、多様な通信方式により実現されると考えられることから、双方向通信による出力制御の実現に必要な、個別送信・同報送信、送達確認、再送制御、セキュリティ（暗号化・認証）などの処理を共通化する通信ソフトウェアを開発することで、今後大量に導入・接続される PCS との相互接続性・対障害性・保守性を向上させることを目的とした。

青森実証各社との連携により「青森フィールドに係る共通インターフェース仕様」として、センターサーバ－PCS 間のアプリケーションレベル及びデータレベルでの共通仕様を作成した。また、作成した仕様にもとづき、多様な通信方式上で統一的に双方向通信による出力制御を実現する汎用通信ソフトウェアを開発した。

⑩－２　試験

開発した汎用通信ソフトウェアを用いて、青森フィールドに、一般に入手可能な WiMAX と FOMA によるインターネット環境を構築し、信頼性・性能・障害回復などの観点での出力制御の実証試験を継続中である。実証状況としては、電文の通信成功率 100%、応答時間は 1 秒台と十分な信頼性と性能が確保できている。引き続き、市販のインターネット回線上でのリアルタイム性の高い双方向通信による出力制御の実現可能性の検証を継続する。

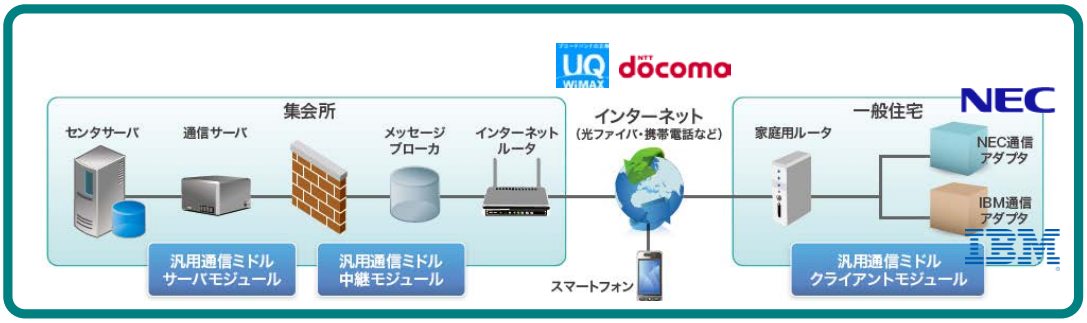


図３－５２．システム構成概要

⑪ 双方向通信に用いる通信手段の検討と基礎試験（ＫＤＤＩ）

⑪－１　開発

広域サービス網（CDMA、WiMAX）を利用したセンターサーバから PV までの概要構成を図３－５３に示す。センター側は、センターサーバ、ルータと接続し、閉域網上に存在する通信サーバを介して需要家側の DCE／端末に接続する。需要家側は、DCE／端末、通信アダプタ、PCS、PV へと接続する。実証試験システムでは、一部の需要家にはスマート PCS の応答を模擬できる DCE/端末を設置することで、通信アダプタの数以上に実測結果を収集する構成としている。

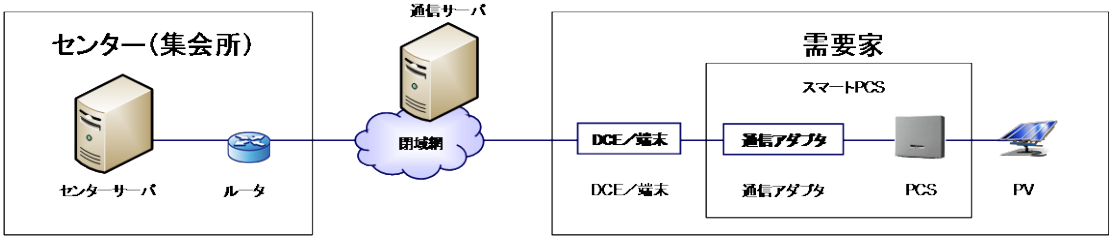


図３－５３．ネットワーク構成の概要

⑪－２　試験

実証期間における試験実施内容は下記 2 点である。

・青森フィールドでの電波環境調査

・青森/高岳/関電工フィールドでの制御通信の記録

制御通信の試験内容については、PCS 出力制御用通信網の構築時期の違いとして 2 つのシナリオを想定し、毎日それぞれのシナリオに沿った試験として制御通信を配信し結果を記録した。

DCE／端末における平成 24 年 12 月 1 日～平成 25 年 7 月 31 日迄の制御通信の成功回数とその地点における初回の電波状況を下記に記す。どちらも通信応答に関し高い通信成功率であり、良好な結果が出ている。

表３－９．DCE／端末における通信成功結果

	CDMA	WiMAX
測定地	基地局 500m圏内　鉄筋建屋内	基地局 1km圏内　木造建屋内
電波状況	○	△
通信応答	1127回／1128	1119回／1128

※電波状況　○：ご利用可能です

△：建物周辺の地形、建物形状、建物内の利用階数・窓からの距離・利用場所等により通信しにくい場合や、圏外となる場合があります。

⑫ 通信事業者の広域サービス網（携帯電話）による双方向通信試験（ＮＴＴドコモ）

⑫－１　開発

FOMA を利用した試験用通信ネットワークの構成を図３－５４に示す。

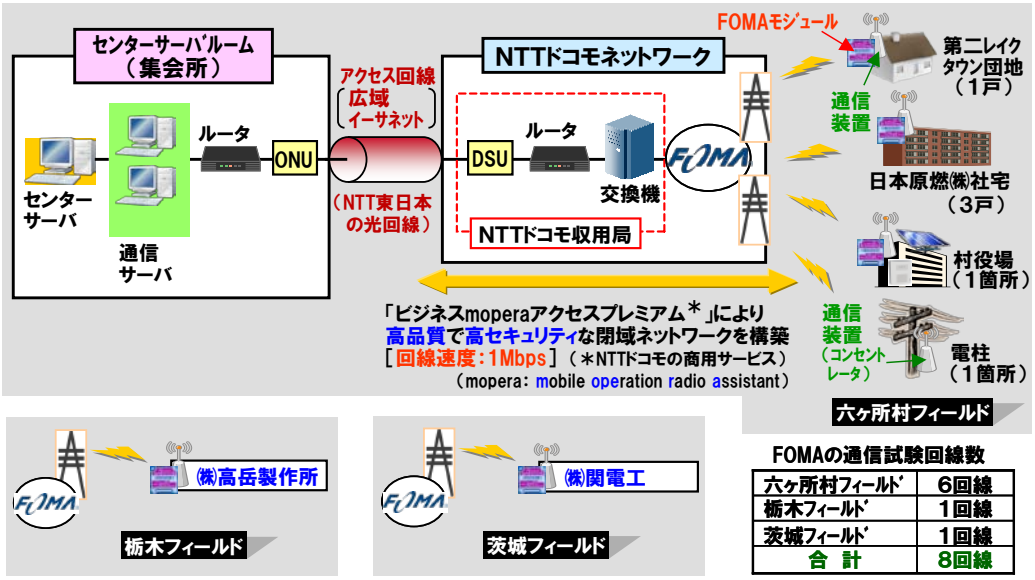


図３－５４．FOMA を利用した試験用通信ネットワークの構成

⑫－２　試験

青森フィールドの FOMA 通信端末設置場所の電波調査結果を表３－１０に示す。どの設置場所も「弱電界」以上を示し、通信品質は概ね問題ないと判断した。

表３－１０．電波調査結果

建物	FOMA端末設置場所	RSCP＊値（dBm）	干渉電力比（dB）	判定
第二レイクタウン団地	トイレ内上部棚	-103（窓付近:-99）	-10（窓付近:-8）	弱電界（窓付近:強電界）
日本原燃（株）西社宅C棟	玄関付近	-94～-89	-11～-10	強電界～弱電界
日本原燃（株）西社宅2号棟	リビングルーム窓側の床	-93（窓付近:-89）	-9（窓付近:-8）	弱電界（窓付近:強電界）
日本原燃（株）西社宅10号棟	台所の床上	-99～-96	-10～-8	強電界～弱電界
村役場第二分庁舎	2階廊下に設置した棚	-82～-80	-7～-6	強電界

［＊RSCP：Received Signal Code Power］

判　定	内　容
強電界	パケット通信可能
弱電界	パケット通信可能＊
圏　外	パケット通信不可

＊IP着信からパケット通信開始まで時間がかかる場合あり。

また、FOMA 通信データの分析結果を図３－５５に示す。（NTT ドコモのトラヒックレポートより）

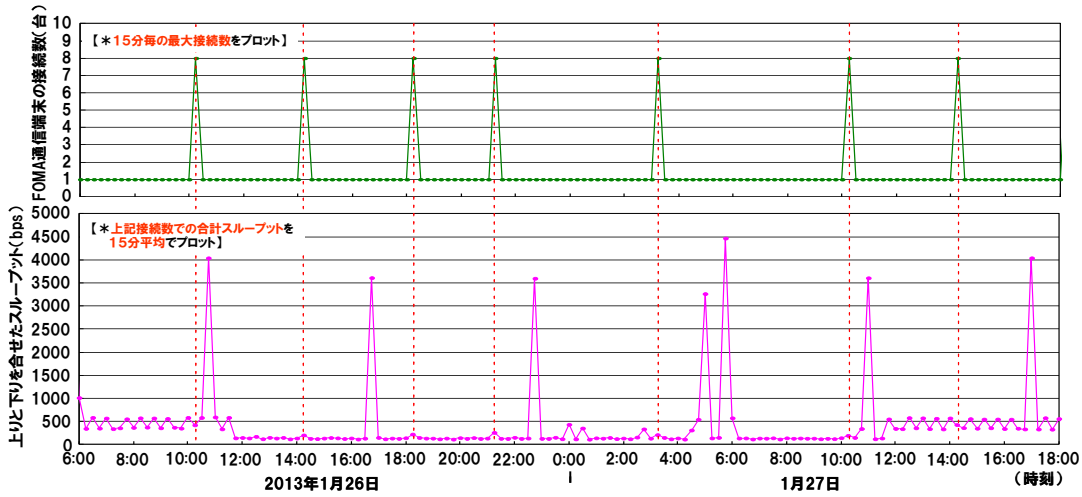


図３－５５．FOMA 通信データの分析結果

FOMA 通信端末の接続数が 8 台の時間帯は、センターサーバからの通信指令の時間帯に一致しており、その時のスループットのピークも観察される。さらに、他法人の FOMA 通信結果も鑑みると、FOMA は双方向通信として問題なく機能していると考えられる。

（５）サイバーセキュリティ関連機器

下記の通り、セキュリティリスクの評価・診断およびサイバーセキュリティ関連機器を開発した。

	参加法人	開発機器	設置場所	達成度
①	ＮＲＩセキュアテクノロジーズ	セキュリティリスク評価・診断 攻撃検知／防御システム	青森フィールド	達成

① セキュリティリスク評価・診断・攻撃検知/防御システムの開発・試験（ＮＲＩセキュアテクノロジーズ）

太陽光発電大量導入に備え、系統状況によって外部からの通信信号に応じて出力をコントロールできる太陽光発電用 PCS を通信と組み合わせた検証とセキュリティ評価を、「机上」「診断」「検知」の三つのアプローチで実施した。

セキュリティ評価は、最初に、システムの対象把握を行い、「机上」「診断」「検知」それぞれ 3 つのステップで実施を行い、最後に全体をまとめることとした。

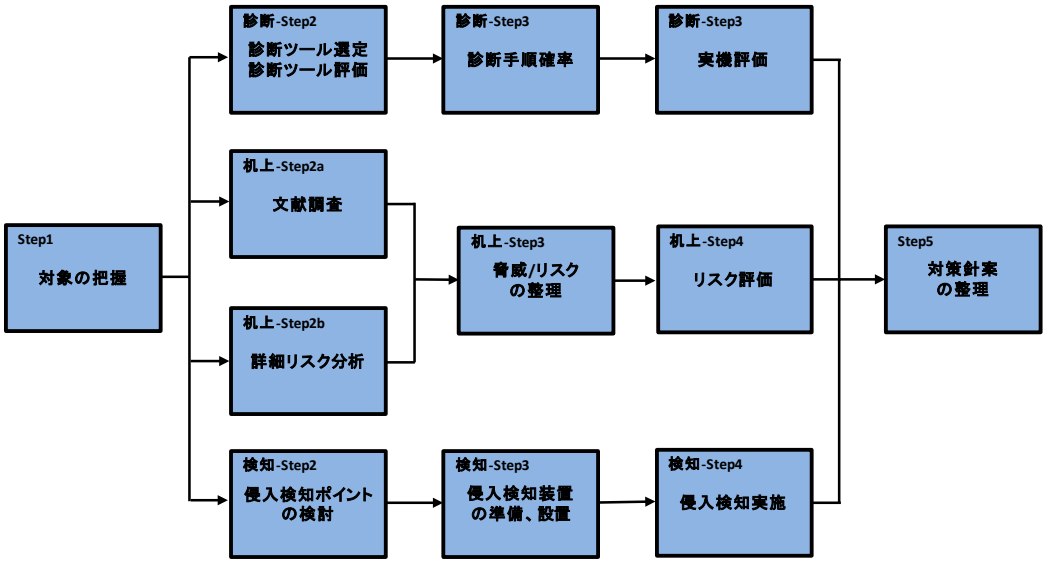


図３－５６．進め方イメージ

「机上」では、本実証事業のシステムを構成する１つ１つの構成要素に対して、機能面、取扱い情報の 2 点からリスクを洗い出し、リスクの顕在率と顕在化した場合の影響度からリスク評価を行った後、技術面、物理面、運用面の 3 つの観点から、対策についてまとめた。

「診断」では、青森フィールドの構成機器に疑似アタックをかけることでシステムの脆弱性を洗い出した。制御系独自の攻撃で行われるような、ファジングという手法を用いて、セキュリティ診断を行うことで、より厳しく制御システムのセキュリティ面での「脆弱点」を洗い出すことができた。

「検知」では、ファジングによる攻撃を含め、検知が可能か調査を行った。青森フィールドで効果的に侵入検知を行うために、ファイアウォールの内側と外側に IDS を設置し、インターネットからの攻撃の状況と、ファイアウォールの効果を測定することとした。システム構成を図３－５７に示す。青森フィールドでは、インターネットからの攻撃を受けなかったことから、自社の検証環境にて攻撃ツールを用い、評価を行った。その結果、既存の機器やシグネチャでは、ファジングのような制御機器向けの専門的な攻撃の検知は出来なかったが、ノウハウを蓄積し、シグネチャのポリシーを適宜変えることで、検知が可能という状況が見えてきた。

実証事業当初、セキュリティのスコープも見えていない状況であったが、当実証事業を行った結果、リスクの整理、実際のシステムの脆弱性とその対策が明確になった。

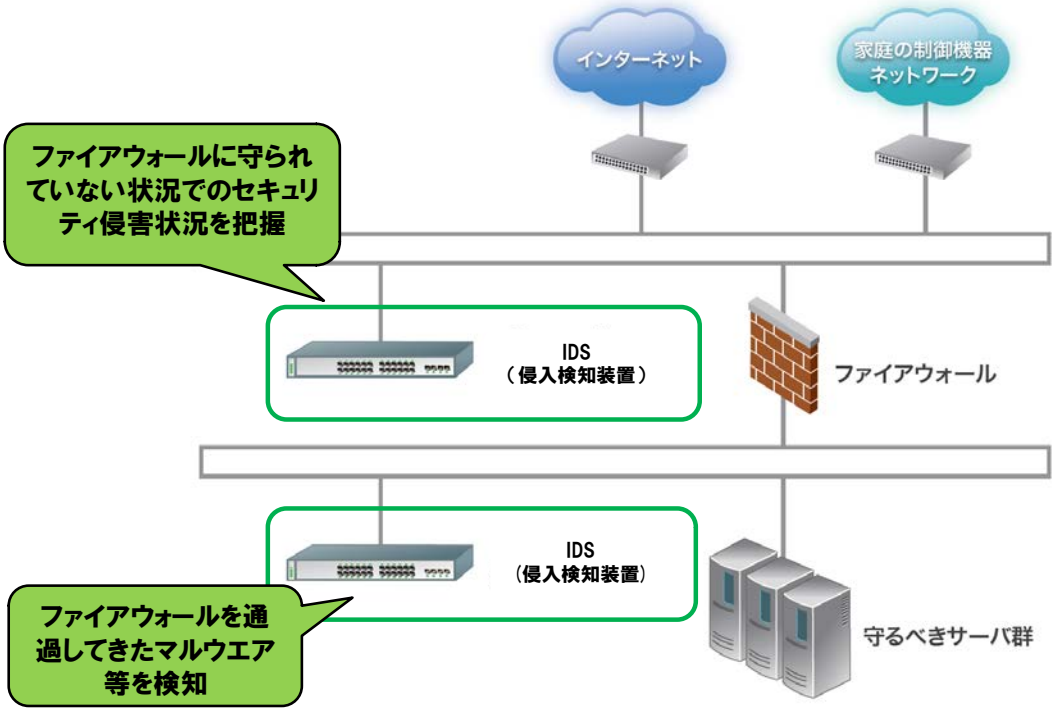


図３－５７．システム構成図

３－１－３　特許出願状況等

表３－１１．特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	国際標準への寄与
①通信による出力制御が可能な太陽光 PCS（住宅用、事業用）	0	0	0	0
②通信による出力制御が可能な蓄電池用 PCS	0	0	0	0
③電圧調整機能付き PCS	0	0	0	0
④双方向通信機器	3	0	0	0
⑤サイバーセキュリティ関連機器	0	0	0	0
全般	3	0	0	0
計	6	0	0	0

表３－１２．論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
発表	電気学会電子・情報・システム部門大会「次世代型双方向通信出力制御実証事業における通信仕様」	H24.9
	電気学会全国大会「再生可能エネルギー大量導入に向けたスマートグリッドの現状と将来展望」	H25.3
	電気学会全国大会「「次世代型双方向通信出力制御実証事業」青森実証フィールドの進捗」	H25.3
	日本太陽エネルギー学会「次世代送配電系統最適制御技術実証事業の取り組み」	H25.8
	IEEE Power Engineering Society「Present status and future prospects of smart grid technologies for massive PV system integration」	H25.8
	電子情報通信学会「「次世代型双方向通信出力制御実証事業」青森実証フィールドの進捗」	H25.9

３－２　目標の達成度

表３－１３．目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標 （中間評価時点）	成果	達成度
①通信による出力制御が可能な太陽光PCS（住宅用、事業用）	・通信機能付き太陽光発電用PCSの開発 ・通信信号に応じて出力をコントロールできること	通信による出力制御実証試験を行う機能を検討し、通信装置とのインターフェースの共通仕様を取り纏め、それらを具備する機器開発を実施し、開発機器の動作試験および通信装置との接続試験を実施した。また現在、実環境へPCSを設置しフィールド試験を実施中であり、結果は良好である。事業終了時には全評価が完了する見込みである。	達成
②通信による	・通信機能付き蓄電池用PCS	充・放電電力制御方法や	達成

出力制御が可能な蓄電池用PCS	の開発 ・通信信号に応じて出力をコントロールできること	主回路定格などの基本仕様ならびに通信機能仕様を検討し、それらを具備する機器開発を実施し、開発機器の動作試験および通信装置との接続試験を実施しており結果は良好である。今後は、実フィールドにおける試験および評価を実施し、事業終了時には完了する見込みである。	
③電圧調整機能付きPCS	・シミュレーション等の検討で選定された最適な制御方式を具備したPCSの開発 ・安定的に動作すること	各種シミュレーションを実施した上で、電圧上昇抑制効果やSVR（Step Voltage Regulator: 電圧調整器）タップ動作への影響、SVC（Static Var Compensator: 静止型無効電力補償装置）制御機能への影響、制御の安定性などを評価項目として、定力率制御方式、電圧依存型定力率制御方式を実証器に具備する制御方式として選定するとともに、基本制御仕様を検討・確定した。さらに前者を組み込んだ3kW級PCSおよび後者を組み込んだ50kW級PCSを製作し、工場試験を実施した。今後は、実フィールドにおける試験および評価を実施し、事業終了時には完了する見込みである。	達成

④双方向通信機器	・PCS の出力制御を実現する種々の双方向通信機器の開発 ・安定的かつ確実に動作すること	センターサーバ～PCS 間の構成、通信手順、電文形式等を議論のうえ取り纏め、PCS の制御を目的とした各種双方向通信において必要となる機器を開発した。また、開発した機器を実証フィールドおよび各社敷地内等において試験を実施した。現在、年間を通じたデータの取得や各種条件下における試験および評価を実施中であり、結果は良好である。事業終了時には全評価が完了する見込みである。	達成
⑤サイバーセキュリティ関連機器	・通信ネットワークに内在する脆弱性の検討・セキュリティ技術の開発 ・想定される攻撃からネットワークを保護できること	スマートグリッドシステムのセキュリティに関わる文献調査などにより、セキュリティリスクに対する対策方針について検討を行った。また、開発した侵入検知システムを青森フィールドに導入し、作成した対策方針を参考に、複数の検知方法についてそれぞれ検知結果の評価を行い結果は良好であった。今後はシステムの試験を引き続き実施し、事業終了時には評価を完了する見込みである。	達成

４　事業化、波及効果について

４－１　事業化の見通し

太陽光の発電出力を制御できる通信機能付き太陽光発電用 PCS、通信機能付き蓄電池用 PCS、PCS の出力制御を実現する種々の双方向通信機器、および各 PCS の通信機能としての各通信メディアについては、事業化に対し十分な技術的成果が得られた。今後の事業化の前提として、現在検討が進められている電力自由化後の電力系統の姿も見据えながら、太陽光発電の双方向通信による出力制御の必要性について、広く関係者と議論を進めていくことが必要である。併せて、誰が太陽光発電の出力制御を主体となって行うのか、設置した PCS をどのような方法で登録するのかなど、制度面からの設計も平行して検討を進めていく必要がある。また、既に普及している太陽光発電設備も出力制御の対象とするのか、もし対象とするならば、どのような方式で行うのかなどについても検討する必要がある。

４－２　波及効果

（１）成果の高度化等に関する波及効果の事例

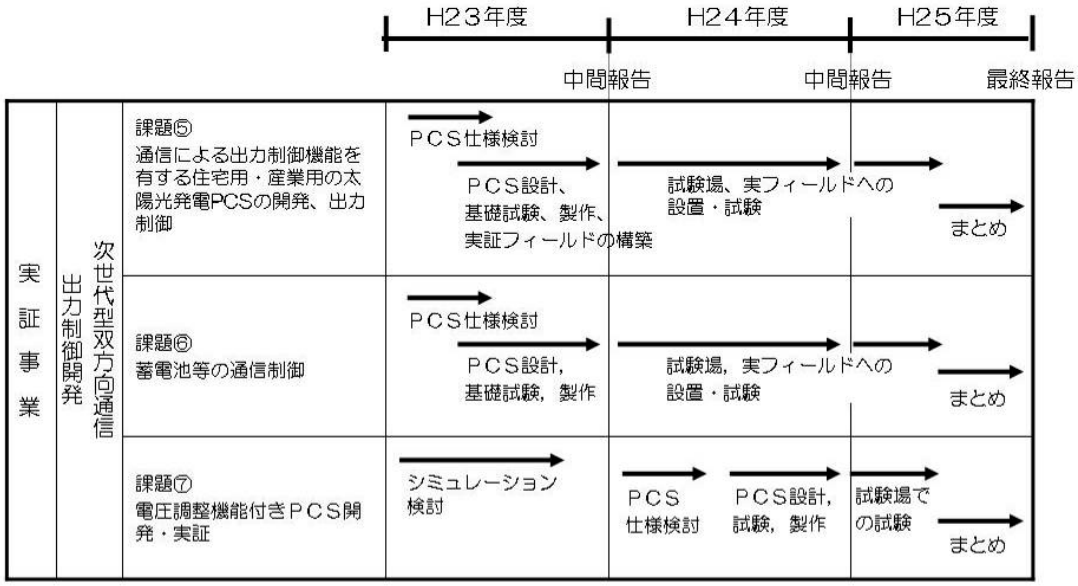
- 双方向通信機能を具備した太陽光発電用 PCS の風力等他の分散電源用 PCS への応用
- 双方向通信機能を具備した系統用蓄電池用 PCS の家庭用蓄電池用 PCS への応用
- 電圧調整機能付き PCS の制御方式の検討ノウハウの配電制御高度化への応用
- PCS 制御用双方向通信方式の他のセンサーネットワーク（スマートメータ、デマンドレスポンスなど）への応用

５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

５－１　研究開発計画

本実証事業は、平成 23 年度から平成 25 年度の 3 ヵ年で実施する。全体概略スケジュールとしては（各要素テーマの詳細スケジュールについては後述する）、平成 23 年度、24 年度に個別機器の開発、制御方式の検討および要素技術開発を実施し、平成 25 年度に総合的な実証試験と評価を行い、成果のとりまとめを行う。

表５－１．研究開発計画



※上記課題と要素技術の関係は以下のとおり。

- 課題⑤
  - 要素技術①：通信による出力制御が可能な太陽光 PCS（住宅用、事業用）
  - 要素技術④：双方向通信機器
  - 要素技術⑤：サイバーセキュリティ関連機器
- 課題⑥
  - 要素技術②：通信による出力制御が可能な蓄電池用 PCS
- 課題⑦
  - 要素技術③：電圧調整機能付き PCS

〇要素技術の計画内容

①通信による出力制御が可能な太陽光 PCS（住宅用、事業用）

現状の太陽光発電用に、データ通信によって制御信号などの授受を行う機能を付加する開発を行う。開発には国内の主要な PCS メーカ８社が参画し、本実証の中で要求する共通の仕様に対し、それぞれが自社製品をベースに付加開発を行う。

②通信による出力制御が可能な蓄電池用 PCS

蓄電池用 PCS に、データ通信によって制御信号などの授受を行う機能を付加する開発を行う。開発には、本実証試験で蓄電池システムを提供する事業者が通信制御機能の付加開発を行う。

③電圧調整機能付き PCS

太陽光発電用 PCS に具備する電圧調整機能は、様々な制御方式が考えられるため、シミュレーション等の検討で望ましい制御方式を絞り込み、家庭用（3～5kW級）、事業用（10～50kW級）の開発を行って、高岳フィールド内の配電ネットワーク試験場を用いて、動作・効果の実証試験を実施する。

④双方向通信機器

電力系統と需要家を結ぶ双方向通信については、電力会社が保有する通信網（光ファイバー、メタルケーブルなど）、通信事業者による広域サービス（携帯電話、WiMAX など）を有効に活用しつつ、ローカルに通信網を形成するための無線 LAN、特小無線（900MHz 帯、400MHz 帯）や、電線そのものをインフラとして活用する電力線搬送（PLC）などから、情報量や通信速度等の要求を満たす通信手段に対し、対象とする地域の通信インフラ、サービス提供の状況や通信環境などに応じて、コスト、信頼性などの観点から最適なものを選定して構成していくことになると考えられる。

本実証試験では、種々の双方向通信の手段に対し、住宅地・商業地・農村などの様々な地域環境や、通信先の第一義的対象である太陽光発電用 PCS の設置環境（宅内、宅外など）を模擬した通信環境を構築し、動作・機能の評価を行う。

試験は、参画企業の工場などの敷地内や、保有ビルなどにおいて、適切な試験系を構築して実施する。

⑤サイバーセキュリティ関連機器

双方向通信によって、太陽光発電や蓄電池を含む機器・システムを制御する状況では、相応のセキュリティ確保が必要となることから、想定される通信ネットワークに内在する危機や脆弱性の検討を行い、防護システムの試作・評価を実施する。

５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

（１）研究開発実施者の実施体制

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、国立大学法人東京大学他３３法人が経済産業省からの委託を受けて実施した。

また、研究開発の実施に当たっては、研究開発を統括するためのプロジェクトリーダ（東京大学　横山教授)、プロジェクトサブリーダ（東京工業大学　赤木教授)、事務局（東京電力、電力中央研究所）を設置するとともに、効率的な本研究開発の遂行のため、実施事項毎にサブワーキンググループ（ＳＷＧ）を組織し、リーダ、サブリーダ、幹事会社を設定して推進した。全体の進捗確認、各ＳＷＧへのフィードバック、ＳＷＧ間の連携などの全体運営は、全体会議、ステアリング会議、幹事会を設置し、随時開催して推進した。

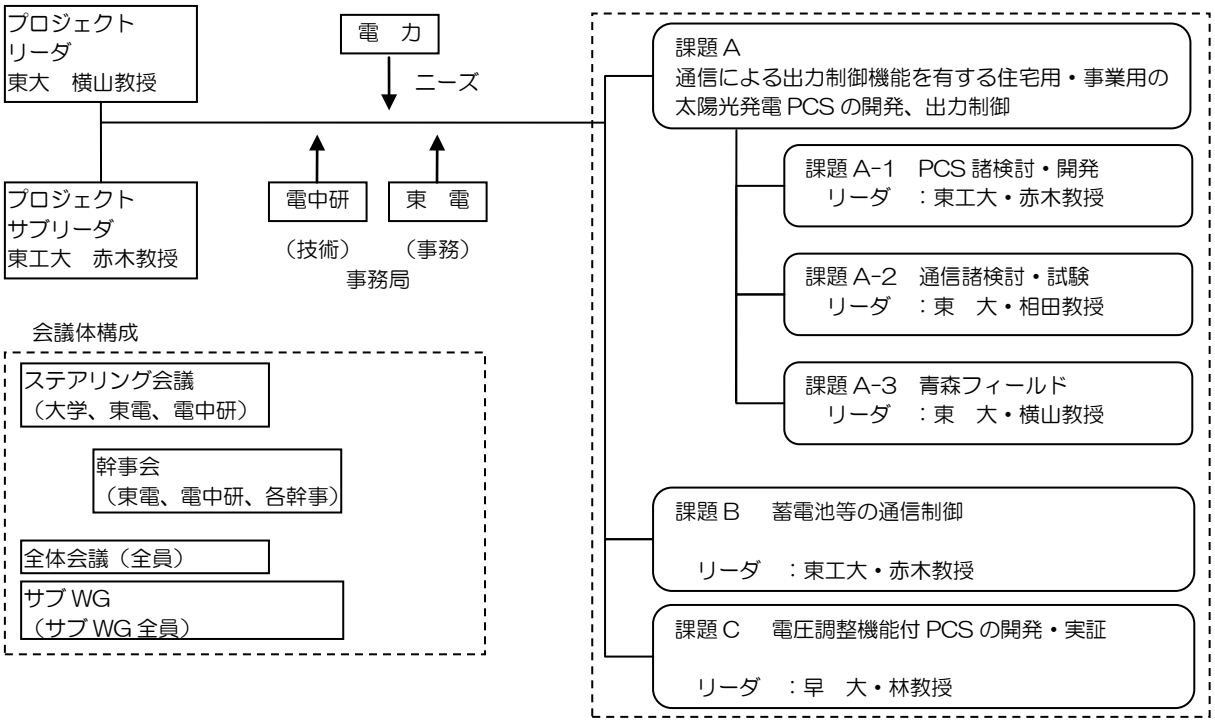


図５－１．研究開発実施体制

表５－２．要素技術と課題の関係

課題 / 要素技術	A1	A2	A3	B	C	法人名
①通信による出力制御が可能な太陽光PCS(住宅用､事業用)	○		○			オムロン、東芝、三洋電機、シャープ、三菱電機、高岳製作所、日新電機、富士電機
②通信による出力制御が可能な蓄電池用PCS			○	○		関電工、高岳製作所
③電圧調整機能付きPCS			○		○	東芝、富士電機
④双方向通信機器		○	○			KDDI、NTT ドコモ、三菱電機、パナソニックシステムネットワークス、富士通、日本電気、日立製作所、東芝、沖電気工業、住友電気工業、日本アイー・ビー・エム
⑤サイバーセキュリティ関連機器		○	○			NRI セキュアテクノロジーズ

（２）実施体制の妥当性

プロジェクトリーダである東京大学横山教授の下、主要開発項目である PCS については国内主要 PCS メーカ８社、双方向通信機器については、国内主要メーカ９社が参画しており、また、通信事業者、セキュリティ関連メーカ、電力会社と、本事業を成す上で必要十分な参加法人の参画により実施することができ、非常に効率的に事業の目的を遂行することが可能となった。

（３）実施者間の連携

課題毎に SWG を組織し、定期的に情報交換を行うことで実施者間の連携を十分とることができている。

５－３　資金配分

研究予算の配分に当たっては、各研究課題担当法人にて年度ごとの研究計画を作成し、資金の見積を行なっている。さらに各法人間にて十分に調整を行った上で研究予算を配分しており、妥当な配分であると考える。

表５－３．資金度配分　　（単位：百万円）

年度　平成	２３	２４	２５	合計
①通信による出力制御が可能な太陽光 PCS（住宅用、事業用）	40.5	7.4	6.4	54.3
②通信による出力制御が可能な蓄電池用 PCS	30.9	7.9	3.8	42.6
③電圧調整機能付き PCS	1.9	5.2	4.4	11.5
④双方向通信機器	368.4	99.8	76.5	544.7
⑤サイバーセキュリティ関連機器	49.6	36.6	8.5	94.7
合計	491.3	156.9	99.6	747.8

５－４　費用対効果

PCSおよび通信機器に関わる主要国内メーカおよび太陽光発電のPCSの出力制御のニーズもとである国内全電力会社の参加により、非常に効率的かつ実効的に実施することができている。

５－５　変化への対応

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災による東京電力福島第１原子力発電所の事故以降、原子力発電所の停止によりベース電源である原子力発電比率が著しく低下し、ＬＮＧや石炭等の化石を燃料とする火力発電を主とする電源構成に変わっている。一方、東日本大震災後は、より一層の再生可能エネルギーを活用することをひとつの軸に、2012 年 7 月に家庭用の太陽光発電も対象に、全量固定価格で買い取る固定価格買取制度が開始し、太陽光発電設備の導入量は着実に増加してきているが、電源構成が大きく変化したことから、当初の想定よりも太陽光発電の出力抑制が必要とされる時期は先になるものと想定される。

また、2013 年 4 月に閣議決定された電力システムに関する改革方針、2013 年 6 月に閣議決定された日本再興戦略において、スマートメータは電力使用量の見える化や柔軟な料金メニューの提供をはじめとする需要家サービスの向上のための基盤であることから、2020 年代早期に全世帯に導入することが決定されている。また、スマートハウス・ビル標準・事業促進検討会では、スマートメータには全てＢルート機能を具備することが合意されている。実証開始当初にはスマートメータのＢルート機能を用いた太陽光発電の出力抑制は想定されていなかったが、本実証ではＢルートを構成する通信メディア（920MHz 帯特定小電力無線、2.4GHz 帯 Wi-Fi、G3 PLC の３種類）についても検証を行っており、スマートメータを活用する場合でも太陽光発電の出力抑制が可能であることを確認している。

以上のように、これまでのところ本事業の目的に影響を及ぼすような大きな情勢変化はなく、また今後新たな情勢変化が発生したとしても、想定される全ての通信方式について PCS との双方向通信が可能であることを確認していることから、技術動向、社会情勢、市場のニーズ変化に対して柔軟に対応できると考えている。

Ｅ．太陽光発電出力予測技術開発実証事業

１　事業の目的・政策的位置付け

１－１　事業の目的

天候等の気象条件により発電出力が変動する太陽光発電が大量に導入されることにより、需給運用が複雑化し、電力の安定供給が損なわれるおそれがあるため、太陽光出力データ収集実証事業（分散型新エネルギー大量導入促進系統安定対策事業、平成 21 年度～平成 23 年度）による太陽光発電の出力データ等や気象情報等を活用し、現在では確立されていない太陽光発電の出力把握や出力予測手法の開発を行い、太陽光発電等の大量導入と安定的な電力供給を確保する次世代送配電ネットワークの構築に寄与することを目的とする。

１－２　政策的位置付け

2009 年 8 月の長期エネルギー需給見通し（再計算）において、太陽光発電の導入を 2020 年に 2005 年の 20 倍程度（約 2,800 万 kW）と想定したことに基づき、次世代送配電ネットワークの構築に向けた系統安定化対策に係る技術的課題の整理、工程表（ロードマップ）の策定、系統安定化対策コストの試算等について検討が行われた。

系統安定化対策に係る技術課題については、余剰電力の発生、周波数調整力の不足、配電系統における電圧上昇等について、その対策と技術的課題の整理を行うとともに、太陽光発電の大量導入を想定し、技術的に解決すべき課題を克服すべく、2020 年までに取り組むべき事項等について図 1-1 のロードマップとして整理され、これに基づき事業を実施している。

１－３　国の関与の必要性

広範囲に大量導入された太陽光発電の出力を予測する技術は、国の政策目標である太陽光発電の大量導入によって必要となる技術である。

また、太陽光発電等の再生可能エネルギーの大量導入は、国のエネルギー政策によって決定されたものであり、それに伴う系統安定化対策については、民間事業者である電力会社とともに国も責任を持って対応することが必要である。

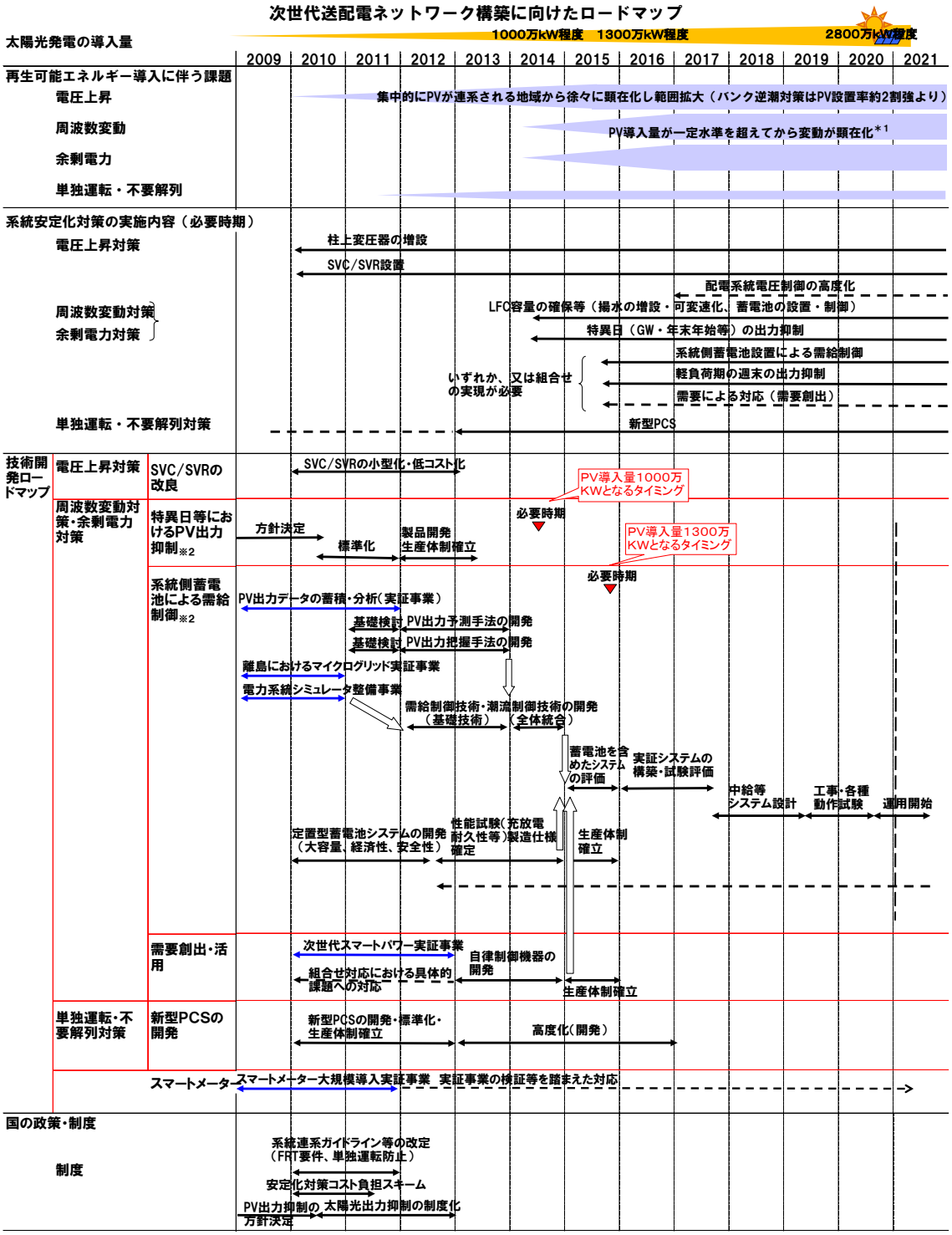


図 1-1　次世代送配電ネットワーク構築に向けたロードマップ

※ 次世代送配電ネットワーク研究会報告書（平成２２年４月）より引用

（ＰＶ導入量見込み、対策時期等は研究会当時のもの）

２　研究開発目標

２－１　研究開発目標

太陽光発電大量導入時に必須となる、太陽光発電の出力状況把握や出力予測のための技術開発を行う。

（１）太陽光発電の出力把握手法の開発

日射量計や配電系統に設置される電圧・潮流センサー等の情報を活用し、太陽光発電のエリア全体での出力状況の把握技術を開発する。

（２）太陽光発電の出力予測技術の開発

気象予報や太陽光発電の出力状況把握技術の確立のもと、日単位や数時間程度の太陽光発電の出力予測技術を開発し、電力系統における安定的な需給運用へつなげる。

２－２　全体の目標設定

太陽光発電出力予測技術開発実証事業の全体の目標は表 2-1 のとおり。

表 2-1　全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
衛星画像や気象データ、分散型新エネルギー大量導入促進系統安定対策事業で設置した日射計を始めとする各種センサーのデータや電流・電圧データから、太陽光発電の現在出力を把握する手法を開発する。	想定している太陽光発電の大量導入は一般家庭への設置が中心であるが、発電電力量計を太陽光発電システムごとに設置し直接発電出力を計測することは、その対象箇所数の多さから膨大なデータを扱う計測システムとその信頼性維持を両立させる必要があり現実的ではないため。
気象予報技術を応用し、日単位や数時間程度の太陽光発電出力を予測する手法を開発する。	天気によって変化する太陽光発電出力の変化を補うために電源設備の出力を変えなければならないが、火力発電機のように発電までに時間がかかるものは、予め起動して系統に並列しておく必要があり、太陽光発電の出力変化が予測できれば、その変化量や時間に応じて必要となる発電機を予め系統に並列する対応をとることが可能となるため。

２－３　個別要素技術の目標設定

太陽光発電出力を推定するプロセスでは、まず日射量の把握または予測を行い、その日射量を元に太陽光発電出力を推定する。

そのため本実証事業ではこのプロセスを「日射量の把握」「日射量の予測」「太陽光発電出力の推定」に分類し、さらに日射量の把握・予測のための「日射量の分析」を加えて実施した。

また、各プロセスにおいては、更に事業者それぞれの独自ノウハウに基づい

た個別要素技術の目標を個別に設定し、各事業者で異なる技術を幅広く用いて事業を実施した。

表 2-2　個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
＜日射量の把握＞		
日射量観測データや気象衛星データからの日射量推定（課題⑧－１）	統合日射量データベースを構築する。	日射量観測データや気象衛星データからの日射量推定技術を用いた全国規模の実況日射量分布推定モデルの開発に必要なため。
空間線形回帰法（クリギング）に基づく空間補間による日射量推定（課題⑧－２）	リアルタイムの日射量マップの作成を目指し、地球統計学の空間線形回帰法（クリギング）に基づく日射の空間補間法を地域PV発電出力把握に適した手法に改良する。	データ入手のタイムラグを極小化することが期待できる日射計観測データを用いて、未計測地点の日射量を空間補間する技術の開発を行うため。
気象衛星データを用いた日射量推定（課題⑧－３）	水平スケール別・天気パターン別に作成した日射量の評価指標値より、水平スケール別・天気パターン別の日射量推定手法の適用範囲を明確にする。	衛星情報等のデータから準リアルタイムで面的な日射量の推定を行うため。
＜日射量の予測＞		
時間スケールに応じた日射量予測（課題⑧－４）	日本気象協会保有の数値予報モデル（SYNFOS-3D）や統合日射量データベースなどを用いて日射量予測手法を開発する。	通常の気象要素（降水量、気温、風など）だけでなく、日射量、大気安定度などの予測が可能なSYNFOS-3D や、日射量把握において構築した統合日射量データベースを用いることで、週間・翌日・当日・数時間先などの時間スケールに応じた日射量予測手法の開発が可能なため。
気象モデルによる日射量の予測（課題⑧－５）	電力中央研究所保有の気象予測・解析システム（NuWFAS）をベースとして、当日・翌日の気温・風速・日射量を予測する。	NuWFAS は、各国の気象予報センターが日々実施している気象予測の格子点情報（GPV：Grid Point Value）を基に、特定地域の気象をより高解像度で予測する数値気象予測システムであり、日射量を直接予測することができるため。

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
気象予測モデルおよび統計手法を用いた日射量の予測 （課題⑧－６）	数値予報データを利用した統計学的手法により日射量を予測するモデルを構築する。	気象庁数値予報データ（GPV）の雲量を元に、統計学的手法により予測を行うことで、演算時間を短くすることができるため。
＜太陽光発電出力の推定＞		
地域の太陽光発電導入状況に対応した太陽光発電出力推定 （課題⑧－７）	地域PV導入状況の違いを考慮可能な推定法を検証し、実運用時に地域毎に予め調査が必要なPV設置状況の要素を整理する。	地域毎の PV 導入状況（太陽電池種類、設置方位等）の違いに対応可能な日射・気象データからの地域 PV 発電出力推定手法を提示できるため。
統計手法を用いた太陽光発電出力推定 （課題⑧－８）	日射量推定・予測値を元に、過去の実測データによる学習および補正などを適用しPV出力を推定する手法を開発する。	過去の実測データによる学習および補正等を行うことで、日射量から太陽光発電出力の推定精度向上を図ることができるため。
日射量推定結果からの太陽光発電出力推定 （課題⑧－９）	太陽光パネル設置地点の位置、パネルの方位・角度・温度、さらにはパネルの種類や PCS の変換効率ほか様々な要因が、日射量から太陽光発電出力への推定に与える影響を整理する。	日射量から太陽光発電出力を推定するための様々な入力データの省略の可否を判断するため。
各種統計モデルと配電線潮流を用いた配電-全体系統の太陽光発電出力推定 （課題⑧－１０）	配電線レベルの広さのPV出力の推定を行う手法を開発する。	太陽光発電出力の変化は、広域では電力系統の周波数に、狭域では地域の電圧に影響を与えるので、配電線レベルの広さの PV 出力推定手法の開発が必要なため。
統計処理による太陽光発電量推定 （課題⑧－１１）	簡易的な手法により、地域の日射強度から発電電力量を推定する手法を開発する。	収集可能な最低限の情報から地域発電量の推定値を求めるため。
＜日射量の分析＞		
日射量データ分析 （課題⑧－１２）	太陽光発電電力量の予測や出力を推定する技術の観点から、用途・目的に応じて日射量や太陽光発電の発電量データがどの程度の空間密度、計測サンプリングで必要であるかを考察する。	PV300 で設置した日射計のデータを様々な角度から分析し、太陽光発電量の予測・推定を行っていくための計測装置の仕様や配置に関する提言を行うため。

３　成果、目標の達成度

３－１　成果

３－１－１　全体成果

太陽光発電大量導入時に必須となる、太陽光発電の出力状況把握や出力予測のための技術を開発した。

（１）太陽光発電の出力把握手法の開発

衛星画像や気象データ、および日射量計や電力系統で計測している潮流値等の情報を活用し、電力の需給運用エリア全体および配電線レベルでの太陽光発電出力の状況を把握する技術を開発した。

（２）太陽光発電の出力予測技術の開発

気象予報技術の応用により、日単位や週間、および数時間先の太陽光発電の出力予測技術を開発した。

３－１－２　個別要素技術成果

（１）日射量の把握

電力の安定供給のためには、需要と供給を時々刻々とバランスさせることが求められるため、太陽光発電出力を把握する必要がある。また地域系統の運用においても、潮流管理のために太陽光発電出力を把握して需要を推定する必要がある。そこで、現在の太陽光発電出力が推定できるよう、日射量（日射強度）を把握するための推定手法を開発した。

（ａ）日射量把握の手法ごとの目標

日射量把握の基準データによる手法ごとの日射量推定目標を表 3-1-1 とした。

表 3-1-1　日射量推定の目標

手法(基準データ)	推定値提示時期	推定する日射量
気象衛星画像 「気象庁所管」	毎時 00 分、40 分 （最大 40 分遅れ）	30 分毎の前 30 分平均値
日射強度観測値 「PV300 等」	推定要求の５分後	５分前の瞬時値

これら各手法の日射量推定の時間的イメージを図 3-1-1、図 3-1-2 に示す。

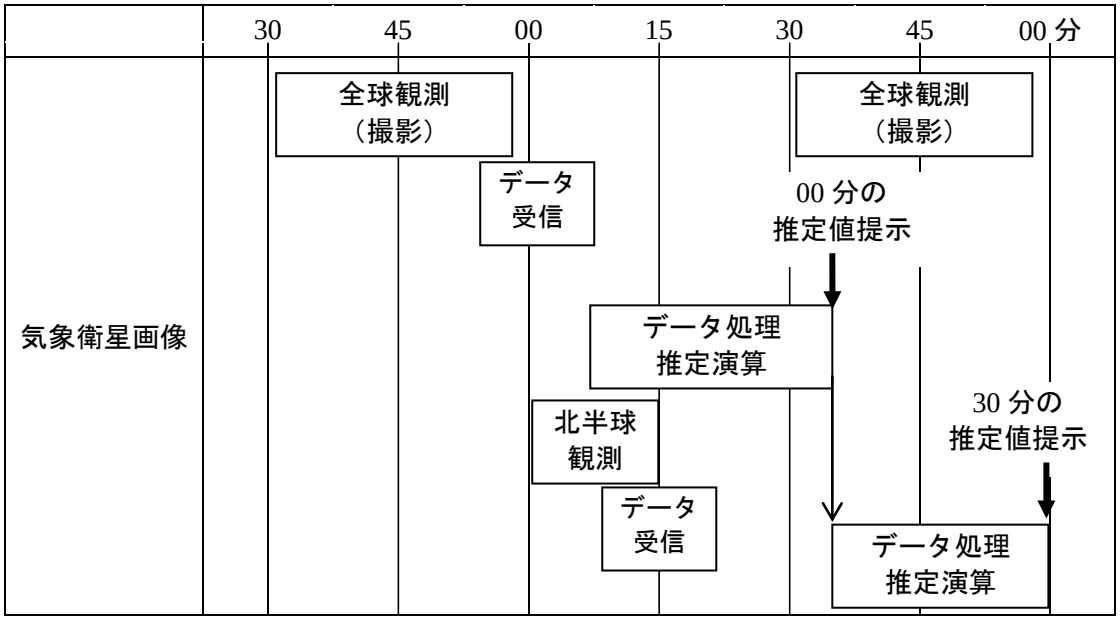


図 3-1-1　気象衛星画像を使った日射量推定イメージ

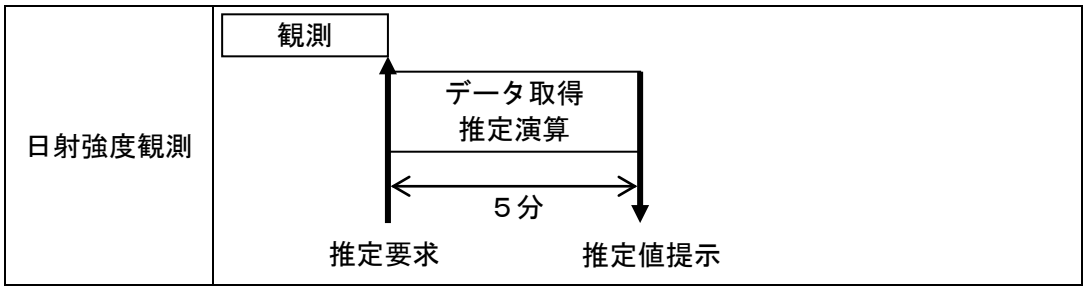


図 3-1-2　日射強度観測値を使った日射量推定イメージ

（ｂ）日射量把握と評価

（ｉ）各課題の担当と推定手法の概要

それぞれの担当の手法概要を以下に示す。

（イ）課題⑧－１：日射量推定の精度向上および太陽光発電出力把握に向けた検討

項目	内容
手法の概要	気象衛星データを用いた推定日射量を観測値で補正し、推定精度を向上させる。
推定結果出力	１ｋｍメッシュの日射強度
推定時間間隔	気象衛星画像の配信間隔による。
特徴	・上空からの観測であるため、広範囲を同じように推定することができる。 ・観測データを組み合わせることで、精度向上を図ることができる。 ・推定時期が気象衛星画像の配信に制約を受ける。

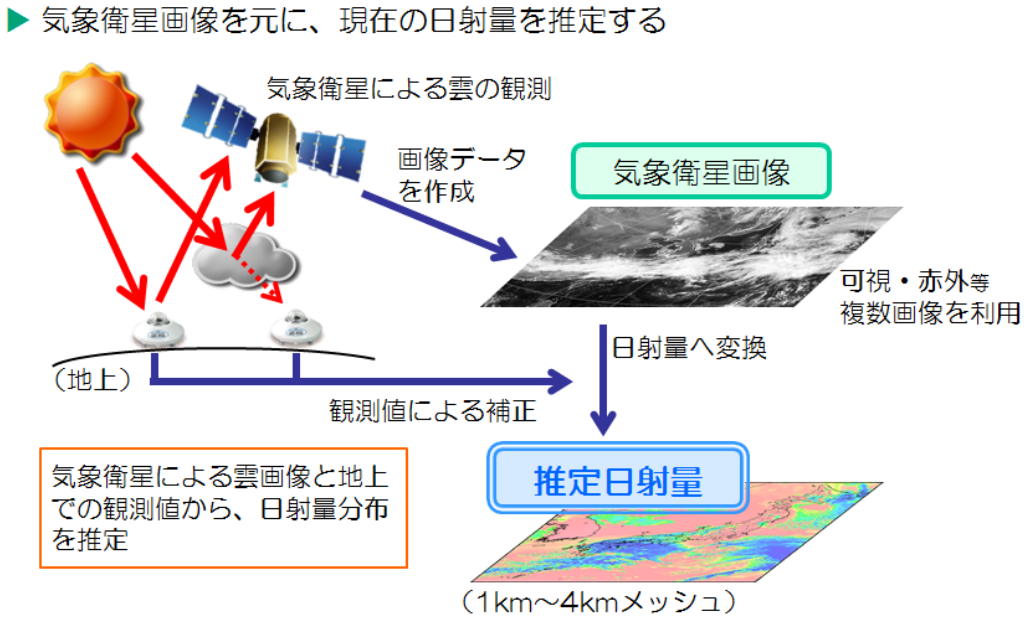


図 3-1-3　気象衛星画像データによる日射把握の概要

（ロ）課題⑧－２：空間線形回帰法（クリギング）に基づく空間補間による日射量推定

項目	内容
手法の概要	PV300 等観測データを用いて、空間線形回帰法(クリギング)に基づく空間補間により推定を行う。
推定結果出力	１ｋｍメッシュの日射強度
推定時間間隔	観測周期による。
特徴	ほぼリアルタイムで日射を把握することができる可能性がある。 観測地点の有無、配置が推定精度を左右する。

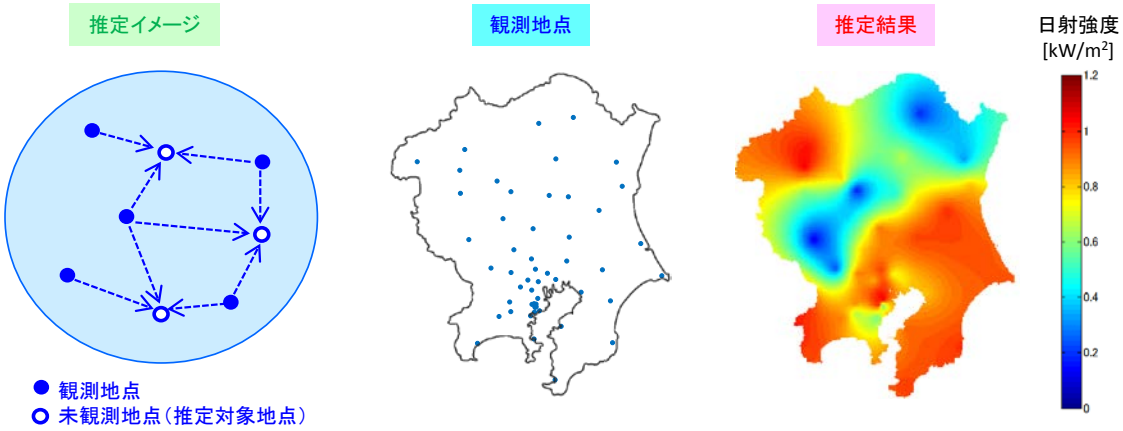
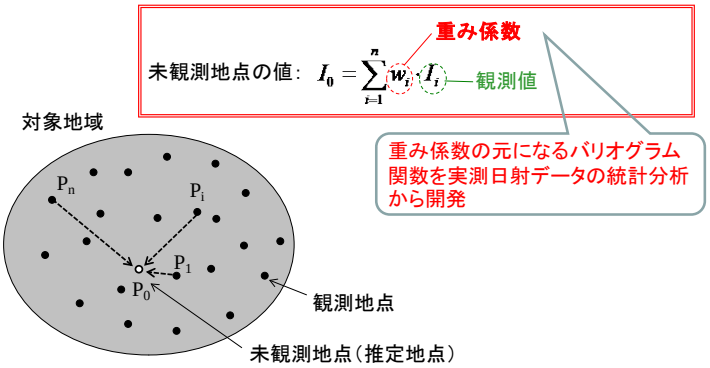


図 3-1-4　観測データの空間補間による日射把握の概要

クリギングとは

クリギング（kriging）とは，未観測地点の未知の物理量を観測地点の既知の値から，統計的に予め求めておいた距離依存性（バリオグラム（variogram）関数という）を用いて，誤差の期待値が数学的に最も少なくなるように推定する地球統計学の手法をいう。

ここでの物理量は日射量であり，未観測地点 P_0 の日射量 I_0 を，その周囲の観測地点 P_i (i=1~n) （n は観測地点数）の日射量観測値 I_i から空間補間推定する。



（ハ）課題⑧－３：気象衛星データを用いた日射量推定

項目	内容
手法の概要	気象衛星データを用いた推定日射量（東京大学竹中特任研究員作成）を観測値で補正し、推定精度を向上させる。
推定結果出力	４ｋｍメッシュの日射強度
推定時間間隔	気象衛星画像の配信間隔による。
特徴	・上空からの観測であるため、広範囲を同じように推定することができる。 ・観測データを組み合わせることで、精度向上を図ることができる。 ・推定時期が気象衛星画像の配信に制約を受ける。

（ⅱ）評価方法

日射量を把握するため、各手法により日射強度推定を行い、PV300 観測値により推定精度を評価した。評価の条件を表 3-1-2 に示す。

評価の基準値には PV300 の全天日射強度観測値（実績値）を使用した。気象衛星画像データを使用して日射量を推定する課題⑧－１と３は、理論上推定結果に地域差がないため、代表地域で評価を行った。代表地域は PV300 観測地点が集中している地域から評価エリアを選定した。これは、PV300 観測地点は地域によっては少ないところがあり、推定結果の誤差か、観測されていない地点の影響かが判別できないおそれがあるためである。また、評価エリアは、地域や観測地点の配置の影響がないことを確認するため、複数の地域と大きさのエリア（表 3-1-3）を選定した。なお、日射強度観測値データを日射量推定に使用する課題⑧－２は、観測点の粗密・配置が精度に影響するが、同じエリアで評価し、時間間隔も比較のため同じ 30 分とした。

表 3-1-2　日射量推定値　評価の条件

評価期間	2010 年 11 月 1 日～2011 年 10 月 31 日（月毎）
評価時間帯	6～18 時（日の出前、日の入り後は除く）
推定の時間間隔	30 分（30 分毎の前 30 分平均）
評価エリア	表 3-1-3 の６地域
評価基準	評価エリア内の PV300 全天日射強度観測値の各地点 30 分平均値の全地点平均
推定値	評価エリア内のメッシュ（海等の非対象地域を除く）ごとの全天日射強度推定値の 30 分平均値の全メッシュ平均

表 3-1-3　評価に使用したエリアの概要

エリアの大きさ	地域	PV300 観測地点数
１０ｋｍ四方	名古屋市中心	５
	横浜市付近	５
２０ｋｍ四方	名古屋市内	１０
	大阪市内	９
４０ｋｍ四方	愛知県西部	１４
	大阪市付近	２０

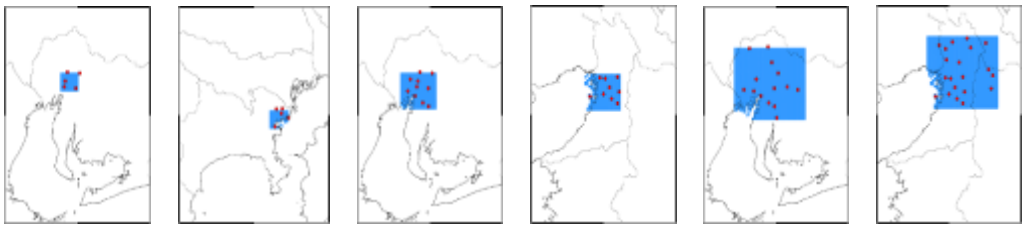


図 3-1-5　評価に使用したエリア

（iii）評価結果

6 時～18 時（日の出前、日の入り後は除く）の年間の推定誤差を RMSE により表 3-1-4 に示す。

まず、衛星画像を使用する課題⑧－１と３の推定手法では、異なる地域においても推定誤差の違いはほとんどないことが確認できた。しかし、評価基準とした PV300 観測値による補正の違いにより、課題⑧－１は観測地点が無い地域の影響を受けて愛知県西部の誤差が大きいのに対し、課題⑧－３は電力管内全エリアで誤差が小さくなるよう調整しておりエリアが大きくなるほど誤差が小さくなるなど、エリアの大きさよる誤差傾向に違いが見られた。

また、日射強度観測値を使用する課題⑧－２の推定手法では、この程度のエリアの大きさと観測地点数があれば、同じように推定ができた。

表 3-1-4　年間推定誤差　（RMSE：W/㎡）

エリアの大きさ	地域	課題⑧－１	課題⑧－２	課題⑧－３
１０ｋｍ四方	名古屋市中心	１６	８	４４
	横浜市付近	１５	１６	３９
２０ｋｍ四方	名古屋市内	１５	６	３３
	大阪市内	１２	９	３１
４０ｋｍ四方	愛知県西部	２０	１０	２８
	大阪市付近	１２	８	２４

※ 基準日射強度：1,000W/㎡

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(ESTi - OBSi)^2}$$

EST ：推定値

OBS ：観測値

RMSE（Root Mean Square Error ）：二乗平均平方根誤差

真値（今回の場合は観測値）からの“ばらつき”を表す。値が小さく０に近いほど精度が高いことを示す。なお，標準偏差を求める式と同じである。

（ⅳ）全国での評価方法

全国で日射量推定を行い、その結果について誤差を確認した。確認条件は表 3-1-2 に準じているが、基準地点が少ないことによる精度の低下があるため評価ではなく確認とした。各電力のサービス区域を確認対象のエリアとし、その大きさ（1km メッシュの数）と PV300 観測地点数を表 3-1-5 に示す。

表 3-1-5　確認に使用したエリアの概要

電力	メッシュ数	PV300 観測地点数
北海道	84, 805	１２
東北	81, 068	２１
東京	38, 607	４８
中部	39, 737	４６
北陸	12, 010	１４
関西	26, 934	３７
中国	29, 963	２１
四国	17, 924	１５
九州	35, 509	２３
沖縄	1, 298	３

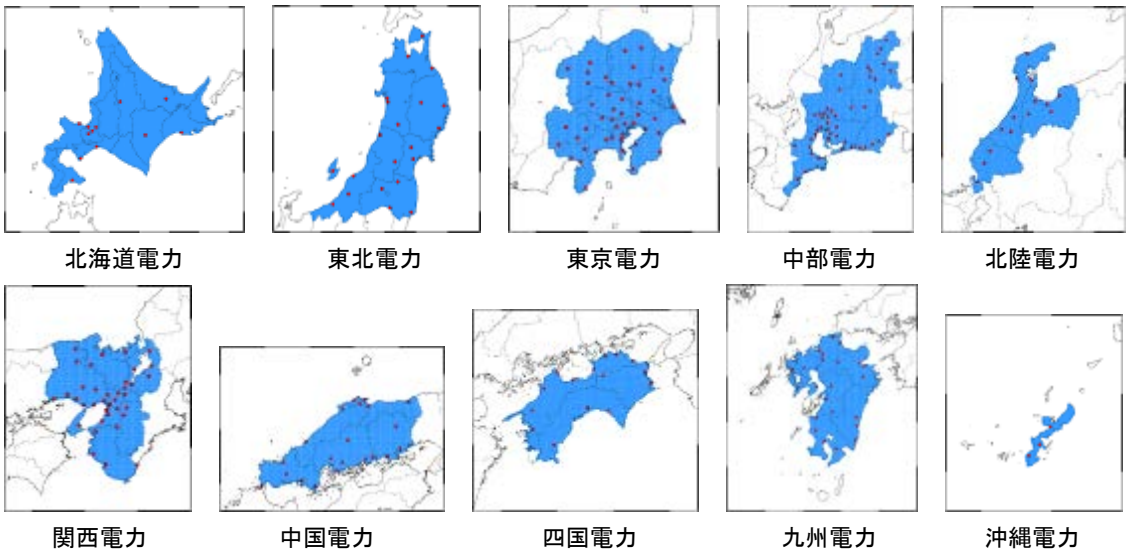


図 3-1-6　確認に使用したエリア

（ｖ）全国での推定結果

6 時～18 時（日の出前、日の入り後は除く）の年間の推定誤差を RMSE により表 3-1-6 に示す。

評価エリアでの推定結果と同様に、衛星画像を使用する課題⑧－１と３の推定手法では、地域の違いによる推定誤差の違いはほとんどないことが、PV300 観測値による補正の違いによる影響があることが確認できた。

また、日射強度観測値を使用する課題⑧－２の推定手法では、北海道と沖縄が他エリアに比べ RMSE が大きくなっているが、これらのエリアの特徴として、基準値とした観測地点に対して推定地点が外挿になっていた範囲が広いためと考えられる。

表 3-1-6　年間推定誤差　（RMSE：W/㎡）

電力	課題⑧－１	課題⑧－２	課題⑧－３
北海道	４１	２１	３７
東北	４５	８	５３
東京	１４	３	４１
中部	２４	４	３３
北陸	２５	７	４２
関西	１８	４	３１
中国	２０	３	４２
四国	２５	４	５６
九州	１６	６	４７
沖縄	３５	２３	４６

（ⅵ）今後の評価のポイント

気象衛星画像による日射量推定と、日射強度観測値に基づく日射量推定は、手法だけでなく、日射量推定結果の形式や得られる周期も異なる。そのため、個々の特徴に沿った評価が必要である。

（２）日射量の予測

太陽光発電の出力は天気によって変化する。例えば天気が晴れから雨や曇りになった場合には、広範囲で出力が減少する。このような出力変化を補うために、電源設備の出力を変化させなければならないが、このような電源設備のうち火力機のように発電までに時間がかかるものは、予め起動して系統に並列しておく必要がある。そこで、太陽光発電の出力変化を推定するために、日射量（日射強度）を予測する手法を開発した。

（ａ）日射量予測の種別ごとの目標

日射量予測の種別ごとの目標を表 3-2-1 とした。

表 3-2-1　日射量予測の目標

予測種別	予測値 提示時期	予測範囲	予測値の出力間隔	予測値
翌日予測	前日１１時	翌日１日間	30 分間隔 （毎正時、30 分）	前 30 分 平均値
当日予測	当日５時	当日１日間	30 分間隔 （毎正時、30 分）	前 30 分 平均値
週間予測	当日１１時	当日含む８日間 （７日先まで）	１日ごと	日積算量
数時間先	任意の 正時、30 分	初期データ時刻から ６時間先まで	30 分間隔 （毎正時、30 分）	前 30 分 平均値
数十分先	任意の ＃０分	初期データ時刻から 60 分先まで	10 分間隔 (00、10、20、30、40、50 分)	前 10 分 平均値

また、各手法の日射量推定の時間的イメージを図 3-2-1～図 3-2-4 に示す。

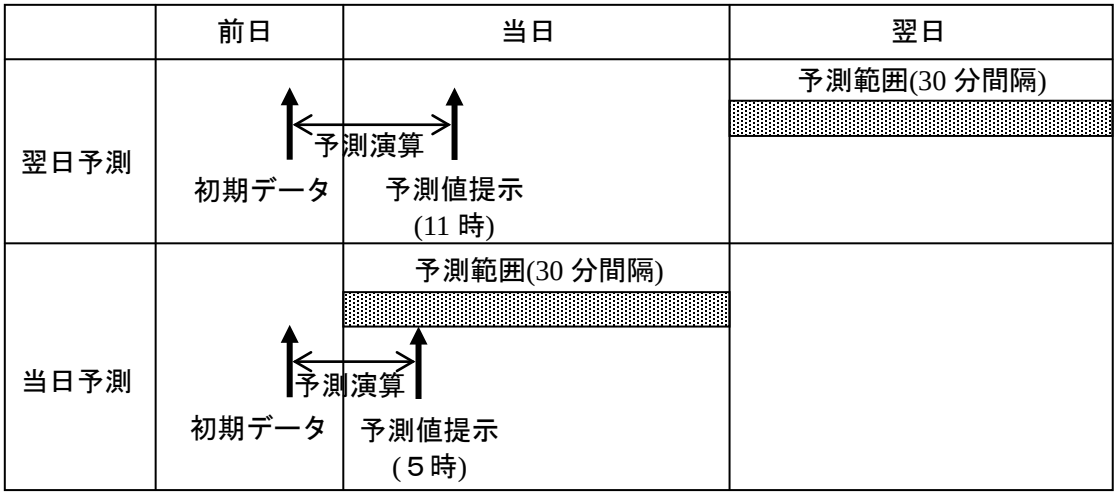


図 3-2-1　翌日、当日の日射量予測イメージ

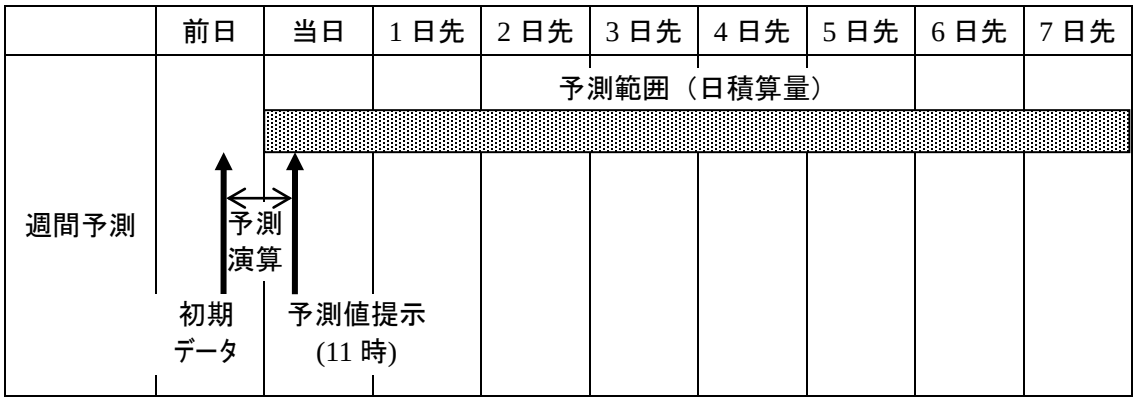


図 3-2-2　週間日射量予測イメージ

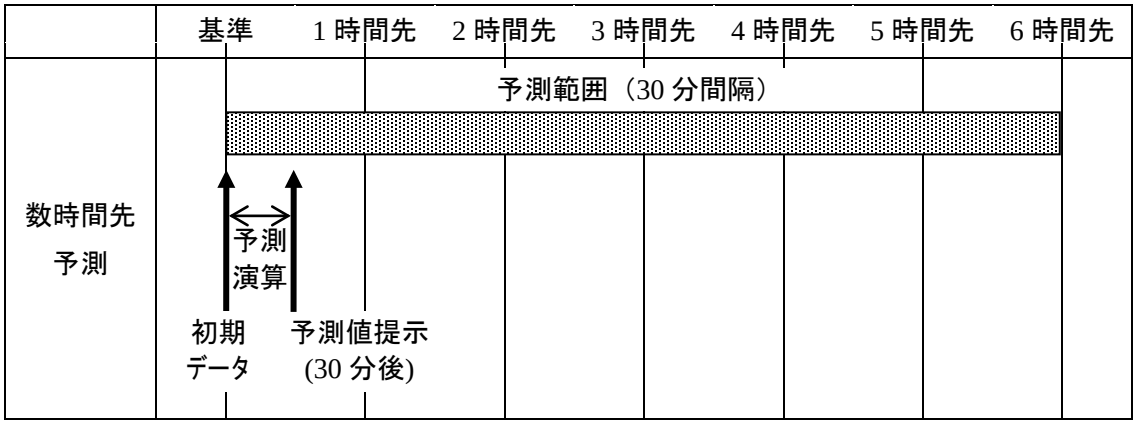


図 3-2-3　数時間先予測イメージ

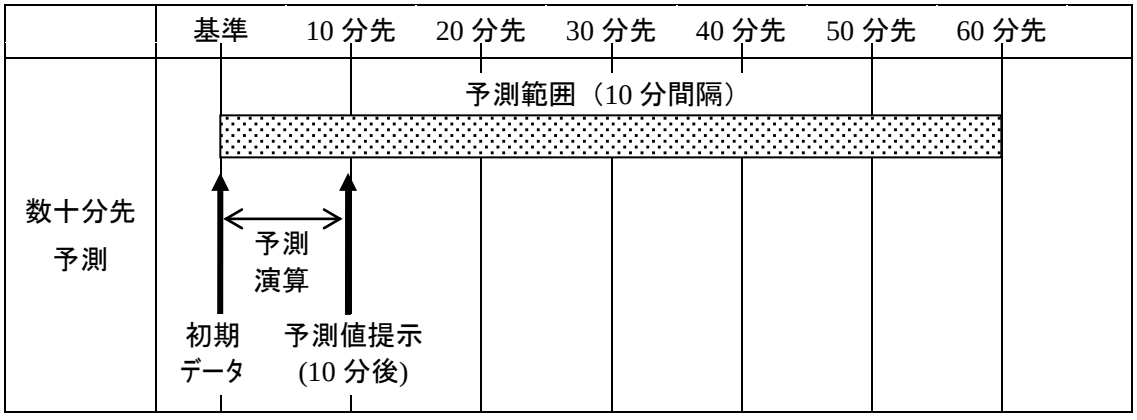


図 3-2-4　数十分先予測イメージ

（ｂ）翌日、当日予測

（ｉ）各課題の担当と手法の概要

それぞれの担当の予測手法の概要を示す。

（イ）課題⑧－４：時間スケールに応じた日射量予測手法の開発および太陽光発電量予測に向けた検討

項目	内容
手法の概要	数値気象モデル（SYNFOS-3D）による予測値を、過去の実測値を用いて統計的に補正する。
推定結果出力	１ｋｍメッシュの日射強度
特徴	・日射予測の目的に応じたパラメータ設定により気象モデルの改良を行い、精度を高めている。 ・予測演算に時間がかかる。

SYNFOS-3D（シンフォス スリーディ）

ギリシャ語で雲を意味する「synnefo」と、数値予報システム「Numerical Forecasting System」の頭文字を組み合わせたもので、「3D」は旧来の「SYNFOS」に 3 次元変分法によるデータ同化機能を加えたという意味

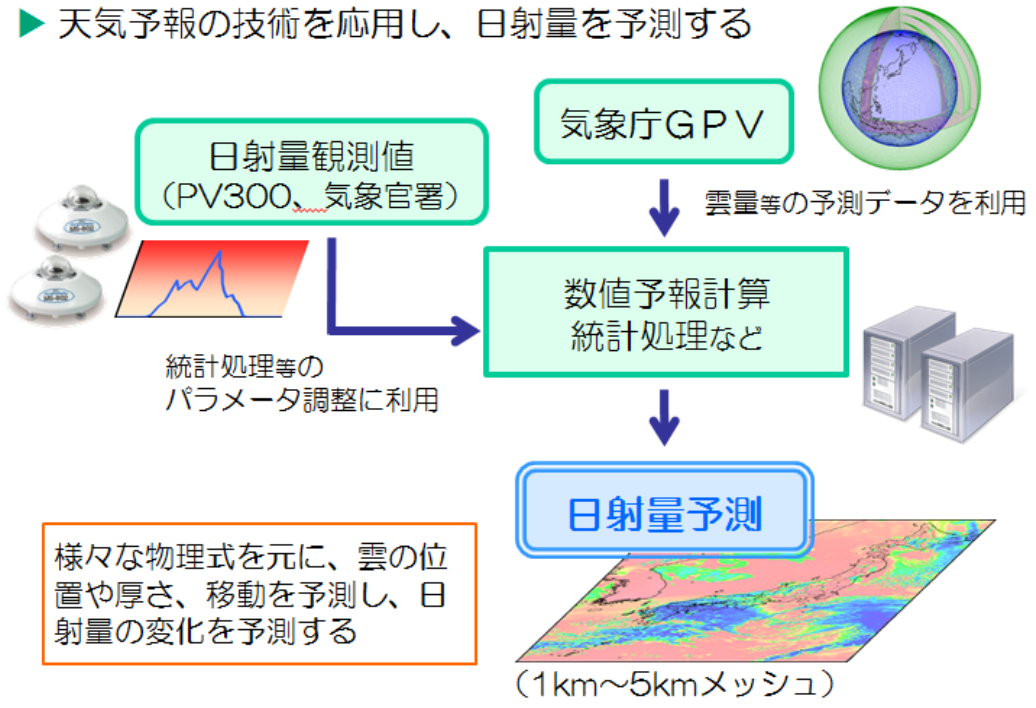


図 3-2-5　天気予報の技術を応用した日射量予測の概要

（ロ）課題⑧－５：気象モデルによる予測

項目	内容
手法の概要	気象予測・解析システム(NuWFAS)により予測を行う。水平領域など適切な計算条件の設定により精度向上を図る。
推定結果出力	５ｋｍメッシュの日射強度
特徴	・特定地域の気象をより高解像度で予測できる。 ・日射量を直接予測できる。 ・予測演算に時間がかかる。

NuWFAS（Numerical Weather Forecasting and Analysis System、ニューファス）

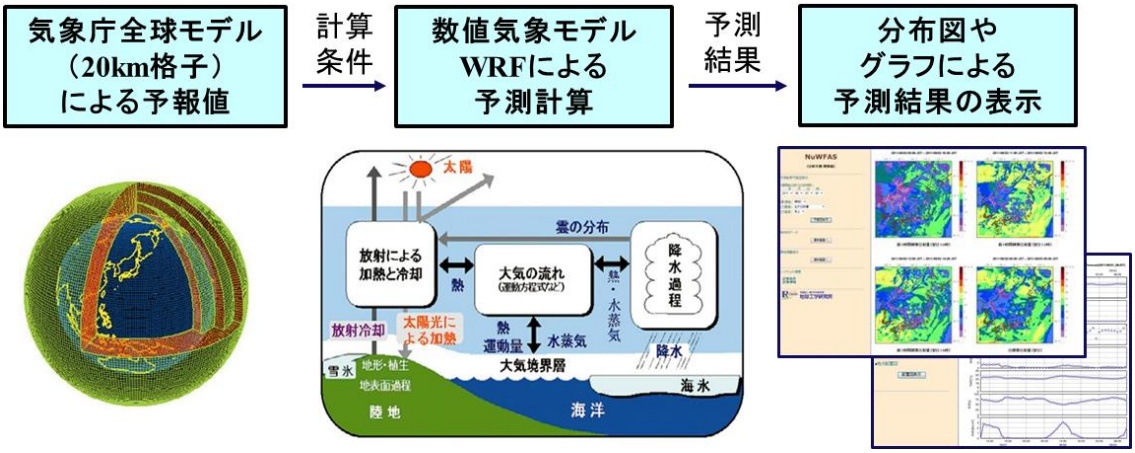


図 3-2-6　気象予測・解析システム（NuWFAS）による日射予測の概要

（ハ）課題⑧－６：気象予測モデルおよび統計手法を用いた予測

項目	内容
手法の概要	気象庁数値予報データ（GPV）の雲量を元に、統計学的手法により予測を行う。
推定結果出力	５ｋｍメッシュの日射強度
特徴	・雲量の計算が不要のため、演算時間が短く最新の GPV データが使用できる。 ・予測メッシュは気象庁の配信データに依る。

GPV（Grid Point Value）：格子点値

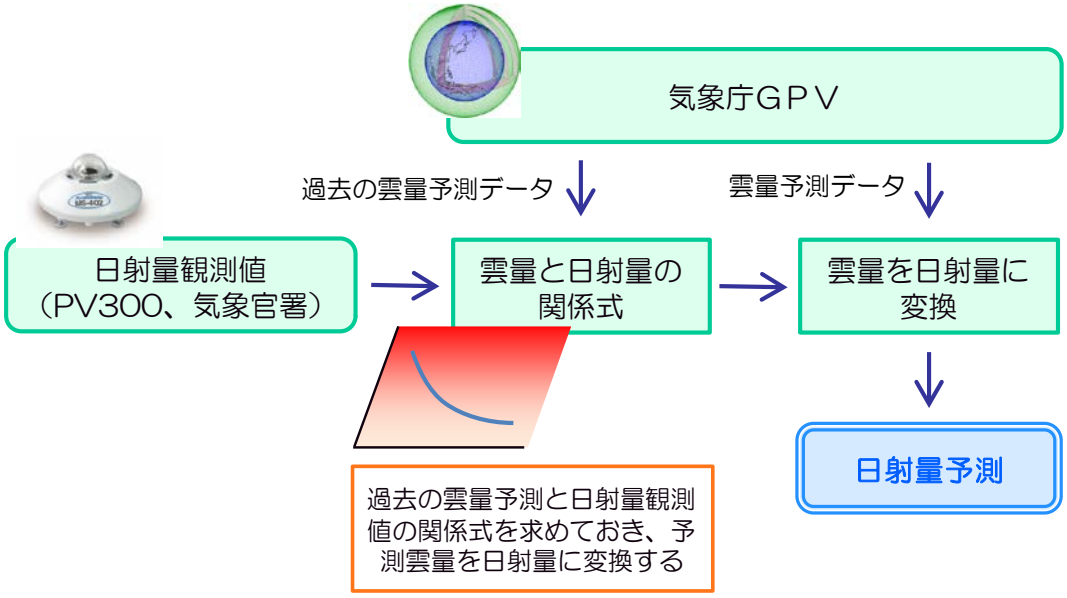


図 3-2-7　気象予測モデルおよび統計手法を用いた日射量予測の概要

（ⅱ）評価方法

各手法による日射量予測値を、PV300 の観測値により予測精度を評価した。評価の条件を表 3-2-2 に示す。

この３手法とも理論上予測精度に地域差がないため、日射量把握と同じ考え方により、代表地域で評価を行った。評価エリアは表 3-1-3 と同じである。

なお一般的な天気予報の間隔は最小で１時間であるが、本事業では 30 分間隔で予測を行っている。

表 3-2-2　日射量予測値　評価の条件

評価期間	2010 年 11 月 1 日～2011 年 10 月 31 日（月毎）
評価時間帯	6～18 時（日の出前、日の入り後は除く）
予測の時間間隔	30 分（30 分毎の前 30 分平均）
評価エリア	表 3-1-3 の６地域
評価基準	評価エリア内の PV300 全天日射強度観測値の各地点 30 分平均値の全地点平均
予測値	評価エリア内のメッシュ（海等の非対象地域を除く）ごとの全天日射強度予測値の 30 分平均値の全メッシュ平均

（ⅲ）評価結果

6 時～18 時（日の出前、日の入り後は除く）の年間の予測誤差のうち、翌日予測の誤差を表 3-2-3 に、当日予測の誤差を表 3-2-4 に示す。

まず、同じ課題ごとでみると、異なる地域において、予測誤差の違いはほとんどなかった。また、エリアが大きくなるほど誤差は小さくなった。これは、広い範囲の予測結果の平均をとることで、予測誤差が空間的に平滑化されているためと考えられる。

なお、翌日予測と当日予測を比べると、当日予測のほうが予測誤差は 10%程度小さくなっている。

表 3-2-3　翌日予測の年間推定誤差　（RMSE：W/㎡）

エリアの大きさ	地域	課題⑧－４	課題⑧－５	課題⑧－６
１０ｋｍ四方	名古屋市中心	１２２	１６６	１２８
	横浜市付近	１３４	１６１	１３２
２０ｋｍ四方	名古屋市内	１１８	１５２	１２１
	大阪市内	１２０	１４８	１２８
４０ｋｍ四方	愛知県西部	１１０	１３８	１１４
	大阪市付近	１０８	１２９	１１７

※ 基準日射強度：1,000kW/㎡

表 3-2-4　当日予測の年間推定誤差　（RMSE：W/㎡）

エリアの大きさ	地域	課題⑧－４	課題⑧－５	課題⑧－６
１０ｋｍ四方	名古屋市中心	１０９	１５６	１１３
	横浜市付近	１０８	１５３	１１３
２０ｋｍ四方	名古屋市内	１０４	１４３	１０９
	大阪市内	１１３	１４１	１２０
４０ｋｍ四方	愛知県西部	９６	１２７	１０３
	大阪市付近	１０１	１２５	１１０

※ 基準日射強度：1,000W/㎡

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(FOREi - OBSi)^2}$$

FORE ：推定値
OBS ：観測値

（ⅳ）全国での予測結果の確認

全国で日射量予測を行い、その結果について誤差を確認した。確認条件は表 3-1-2 に準じているが、基準地点が少ないことによる精度の低下があるため評価ではなく確認とした。

日射量把握と同様に、各電力のサービス区域を確認エリアに設定し、確認を行った。各確認エリア内の PV300 観測地点数と、6 時～18 時（日の出前、日の入り後は除く）の年間の推定精度を RMSE により表 3-2-5、表 3-2-6 に示す。

PV300 観測地点の数や、推定範囲内の配置の影響により推定誤差が大きくなった地域があるが、大幅な違いは見られず、沖縄を除く地域では同等に推定ができることが確認できた。

なお沖縄は、海が６割以上を占め実際の予測エリアが小さいこと、海が日射予測に影響することにより誤差が大きくなったと考えられる。

表 3-2-5　翌日予測の年間推定誤差　（RMSE：W/㎡）

電力	PV300 観測地点数	課題⑧－４	課題⑧－５	課題⑧－６
北海道	12	８１	８７	１２３
東北	21	６６	７４	１３０
東京	48	８４	１０２	１２５
中部	46	８２	８８	１１９
北陸	14	１００	１１２	１３５
関西	37	８６	９７	１２７
中国	21	８４	９９	１２５
四国	15	８７	１０１	１３２
九州	23	８２	９６	１２２
沖縄	３	１３７	１５９	１５０

表 3-2-6　当日予測の年間推定誤差　（RMSE：W/㎡）

電力	PV300 観測地点数	課題⑧－４	課題⑧－５	課題⑧－６
北海道	12	６８	８２	１１６
東北	21	５４	７０	１２１
東京	48	６５	９０	１１１
中部	46	６９	８１	１０９
北陸	14	７９	１０３	１２６
関西	37	７６	８６	１１９
中国	21	７０	８９	１１８
四国	15	７８	９１	１２２
九州	23	７０	９１	１１３
沖縄	３	１２９	１５４	１４１

（ｃ）週間予測

課題⑧－４の中で週間予測を検討している。その手法の概要と評価結果を示す。

（ｉ）週間予測の概要

項目	内容
手法の概要	気象庁全球モデル（GSM）をベースとして、統計手法により精度向上を図る。
推定結果出力	５ｋｍメッシュの日積算量
特徴	・GSM の利用は、天気の長期予報と同じ（予報は 20km メッシュ） ・時期が先に行くほど誤差が大きくなる

GSM（Global Spectral Model）：地球全体の大気を対象とした数値予報モデル

（ii）全国での予測結果の確認

全国で週間予測を行い、その結果について誤差を確認した。確認は表 3-1-5 と同じエリアで行った。結果を表 3-2-7 に示す。

1～2 日先において RMSE の値がおよそ 100W/m^2 を下回っているが、予測対象日が先になるにつれてこの値が大きくなり、最大で 160 W/m^2 程度まで RMSE が大きくなった。また、沖縄では RMSE が他の地方よりやや大きくなる傾向が見られたが、他のエリア間で地域差はみられなかった。

表 3-2-7　週間予測の年間推定誤差（RMSE：W/㎡）

電力	PV300 観測地点数	1 日先	2 日先	3 日先	4 日先	5 日先	6 日先	7 日先
北海道	１２	８９	９５	１０９	１１６	１２３	１３２	１４３
東北	２１	７０	７７	８６	９８	１１０	１１３	１２３
東京	４８	９３	１０２	１０９	１２４	１４７	１５１	１６０
中部	４６	８５	１０２	１１１	１３３	１５０	１５３	１６３
北陸	１４	９９	１１３	１１９	１４０	１４９	１５６	１６８
関西	３７	９４	１０３	１１２	１３８	１４８	１５４	１５９
中国	２１	９０	９６	１１０	１３３	１４４	１５１	１５８
四国	１５	９３	１０３	１２２	１４１	１５４	１６１	１６７
九州	２３	９３	１０２	１１４	１３１	１４２	１５４	１５８
沖縄	３	１５７	１６１	１６２	１６８	１７９	１８１	１９１

（ｄ）数時間先予測

課題⑧－４の中で数時間先予測を検討している。その手法の概要と確認結果を示す。

（ｉ）数時間先予測の概要

項目	内容
手法の概要	過去数時間分の日射量から運動学的手法により、数時間先の日射量分布の移動予測を行う。地形性の雲の発生を考慮することで精度向上を図る。
推定結果出力	１ｋｍメッシュの日射強度
予測時間間隔	30 分間隔で６時間先まで
特徴	・現在の状態から予測するため、数時間先であれば気象モデルの予測より精度が高い。 ・急に雲が発生した場合には誤差が大きくなる。

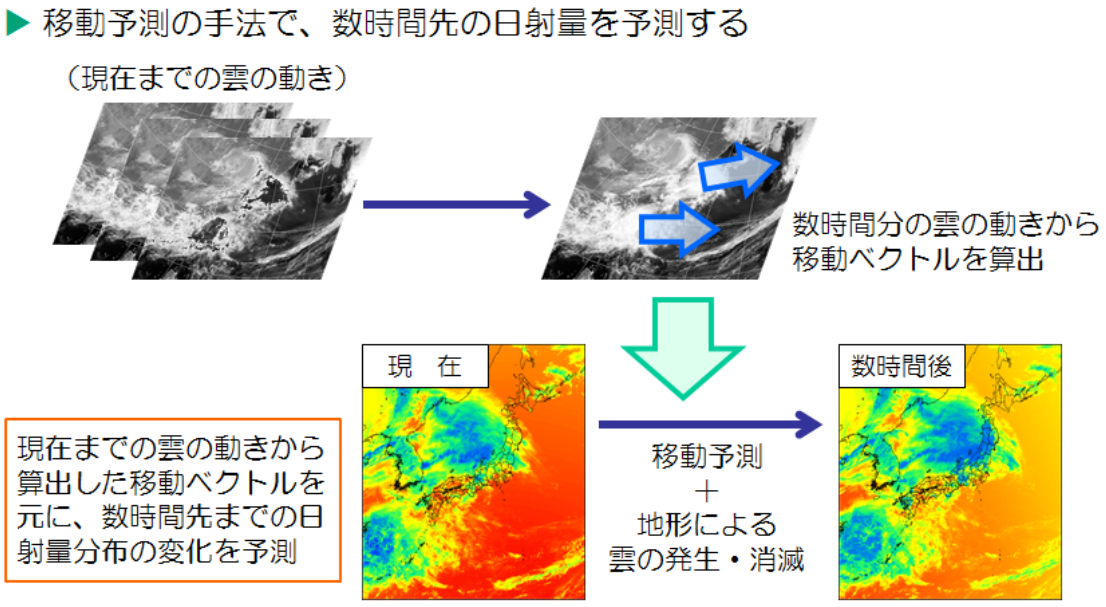


図 3-2-8　移動予測の手法を用いた日射量の数時間先予測の概要

（ii）全国での予測結果の確認

全国で 11 時 00 分を初期時刻とした場合の数時間先予測を行い、その結果について誤差を確認した。確認は表 3-1-5 と同じエリアで行い、その結果を表 3-2-8 に示す。

おおむね３時間先までは予測時間に応じて RMSE が高くなっているが、その後は日射強度が小さくなるのに伴い、減少に転じている。

表 3-2-8　数時間先予測の年間推定誤差（RMSE：W/㎡）

電力	PV300 観測地点数	１時間先	２時間先	３時間先	４時間先	５時間先	６時間先
北海道	１２	６６	７４	７３	６９	５２	４２
東北	２１	７３	８３	８７	８５	６８	４７
東京	４８	３９	６２	７９	８８	７７	５３
中部	４６	５２	７２	７９	８０	７２	５０
北陸	１４	６２	８０	９６	９７	８４	５４
関西	３７	４６	６５	８０	８０	７０	４６
中国	２１	５３	７８	８４	８１	６８	４８
四国	１５	５７	７５	８９	９０	７５	５４
九州	２３	５０	６９	８５	８９	７６	６０
沖縄	３	１２３	１５４	１６９	１５４	１２６	８５

（ｅ）数十分先予測

課題⑧－４の中で数十分先予測を検討している。その手法の概要と確認結果を示す。

（ｉ）数十分先予測の概要

項目	内容
手法の概要	観測された日射量の短周期変動成分の解析により数十分先の日射量を予測する。また、日射変動特性の平滑化効果を加味し、広域空間での予測も行う。
予測メッシュ	１ｋｍ、平滑化効果を加味した場合はエリア全体
予測時間間隔	10 分間隔で 30 分～60 分程度先まで
特徴	・現在および過去の観測値の精度が予測精度を左右する。 ・気象モデルや衛星画像を用いず、観測値のみで予測できる。

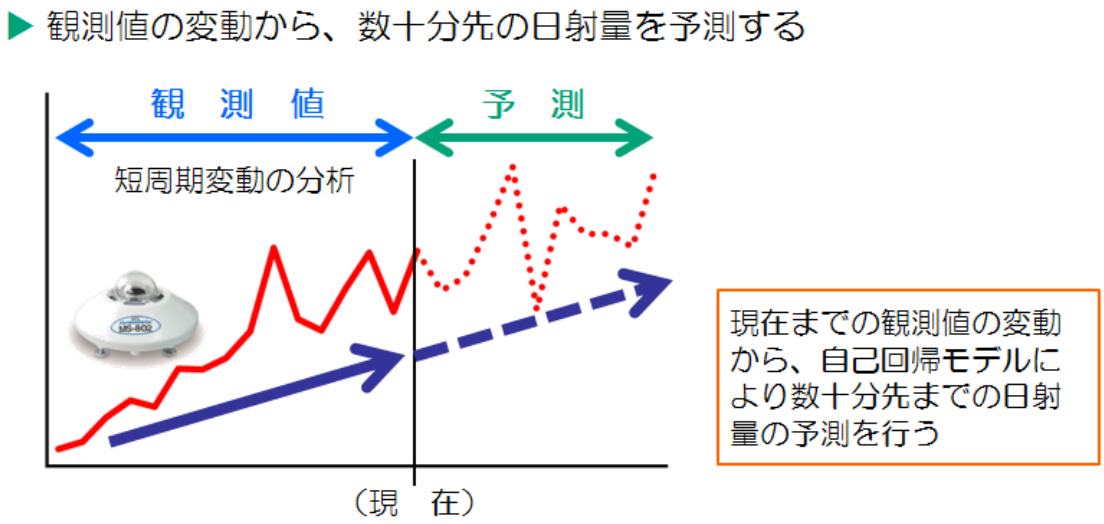


図 3-2-9　日射量の数十分先予測の概要

（ii）全国での予測結果の確認

全国で数十分先予測を行い、午前 9 時～午後 15 時の時間帯での結果について誤差を確認した。本手法は、予測のベースとなる日射量観測地点数が密である必要があるため、各電力のサービス区域内に 20km 四方のエリアを一つ設定し確認を行った。各確認エリア内の PV300 観測地点数と結果を表 3-2-9 に示す。

広域的な数十分先予測を実施することで、全国的に直近の 10 分先では RMSE が 100W/m^2 未満、おおよそ 40 分先までは RMSE が 150W/m^2 程度に収まることがわかった。

表 3-2-9　数十分先予測の年間推定誤差（RMSE：W/㎡）

電力	PV300 観測地点数	10 分先	20 分先	30 分先	40 分先	50 分先	60 分先
北海道	１０	７８	９７	１１２	１２４	１３５	１４７
東北	２	１０５	１２４	１３８	１４９	１５９	１７０
東京	１０	８８	１０９	１２５	１３９	１５２	１６６
中部	１０	８３	１０４	１２０	１３４	１４７	１６０
北陸	５	９６	１１６	１３１	１４４	１５６	１６８
関西	９	８１	１０１	１１７	１３１	１４４	１５８
中国	７	９２	１１２	１２７	１４０	１５２	１６３
四国	３	１０５	１２７	１４２	１５４	１６６	１７８
九州	３	８６	１０４	１１８	１３１	１４３	１５５
沖縄	３	１０２	１２２	１３８	１５１	１６４	１７７

（３）太陽光発電出力の推定

太陽光発電出力の推定は、３つに大別している。

① 把握した日射量（日射強度）あるいは予測した日射量（日射強度）から、広域での太陽光発電出力を推定する。

② 配電線レベルから系統全体までの需要変化も含めた PV 出力変化を推定する。

③ 日射強度から太陽光発電出力への推定誤差の要因を分析し、その影響を評価する。

（ａ）広域での太陽光発電出力推定

分類①のそれぞれの推定手法の概要を示す。なお推定時間間隔は日射量の推定・予測間隔に依る。

（ｉ）手法の概要

（イ）課題⑧－７：地域の太陽光発電導入状況に対応した太陽光発電出力推定

項目	内容
手法の概要	水平面日射強度と気温から PV 出力を推定する。さらに地域の PV 導入状況に対応した PV 出力推定も念頭に入れる。
推定メッシュ	５ｋｍ
特徴	太陽電池パネルの設置角度や方位に応じた PV 出力を推定するため、水平面日射強度から傾斜面日射への変換を行い、気温からモジュール温度を推定することで、誤差の少ない PV 出力を推定する。

（ロ） 課題⑧－８：統計手法を用いた太陽光発電出力変換手法の構築

項目	内容
手法の概要	日射量推定・予測値をもとに、過去の実測データによる学習および補正などを適用し PV 出力を推定する。
推定メッシュ	５ｋｍ
特徴	日射量の推定・予測誤差も勘案し、天気パターン・エリア広さ別などで補正を行う。

（ハ）課題⑧－１１：統計処理による発電量推定

項目	内容
手法の概要	簡易な手法により、日射量から PV 出力を推定する。自社のモニターデータも利用している。
推定メッシュ	５ｋｍ
特徴	日射量、気温のみで PV 出力を推定し、学習データにより補正をかけ精度を上げる。 元々少ないデータで出力推定を行うため、学習データが少ないと精度が落ちる。

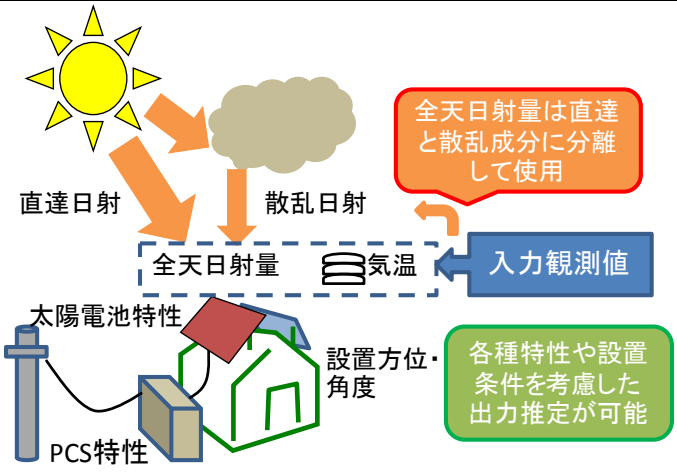


図 3-3-1　広域での太陽光発電出力推定の概要

（ⅱ）評価方法

各手法による太陽光発電出力の推定値を、PV300 の太陽光発電出力観測値により評価した。評価の条件を表 3-3-1 に示す。

ここでは、日射から太陽光発電出力を推定する手法の評価であるため、評価エリアは、太陽光発電出力を計測し、かつ PV300 観測地点が集中しているエリアとした。そのため、日射量把握、予測で採用して地点と異なる地域を選定した。それぞれのエリアを表 3-3-2 に示す。また、地域や観測地点の配置の影響が

ないことを確認するため、それぞれ異なる地域と大きさのエリアとした。

なお、実際の運用時には、把握あるいは予測された日射量を元に太陽光発電出力を推定するが、ここでは日射量推定値の誤差を除くため、PV300 全天日射強度観測値から太陽光発電出力を推定した。

表 3-3-1　太陽光発電出力推定値　評価の条件

評価期間	2010 年 11 月 1 日～2011 年 10 月 31 日（月毎）課題⑧－７、８ 2011 年 1 月 1 日～2011 年 12 月 31 日（月毎）課題⑧－１１
評価時間帯	9～12 時、12～15 時
評価の時間間隔	30 分（30 分毎の前 30 分平均）
評価エリア	表 3-3-2 の３地域
全天日射強度	評価エリア内各地点の PV300 全天日射強度観測値の 30 分平均値（30 分毎の前 30 分平均）
評価基準	評価エリア内の PV300 太陽光発電出力観測値の各地点 30 分平均値の全地点平均
推定値	評価エリア内の各地点太陽光発電出力推定値の 30 分平均値の全地点平均

表 3-3-2　評価に使用したエリアの概要

エリアの大きさ	地域	PV300 観測地点数
１０ｋｍ四方	富山市付近	５
２０ｋｍ四方	京浜付近	４
３０ｋｍ四方	名古屋市付近	８

（ⅲ）評価結果

9 時～15 時の年間推定誤差を、太陽電池出力定格値を基準とした RMSE(%)により表 3-3-3 に示す。

地域、エリアの大きさに関わらず、同程度の誤差の大きさとなった。なお、富山市付近など積雪の影響を受ける地域では、日射があっても発電しないことによる誤差の拡大も考えられる。

また、課題⑧－１１については、過去のデータを元に補正をかけるため、学習期間にシステムに不具合があると精度が悪くなる（名古屋市付近の９％）。しかし、不具合データを排除すると、同等の結果が得られる（括弧内５％）。

表 3-3-3　広域での太陽光発電出力推定の年間推定誤差（RMSE：%）

エリアの大きさ	地域	課題⑧－７	課題⑧－８	課題⑧－１１
１０ｋｍ四方	富山市付近	６	５	５
２０ｋｍ四方	京浜地区	４	５	４
３０ｋｍ四方	名古屋市付近	２	３	９（５）

（ｂ）配電線レベルでの太陽光発電出力推定

太陽光発電出力の変化は、広域では電力系統の周波数に、狭域では地域の電圧に影響を与える。そのため、分類②では配電線レベルの広さまで含めた PV 出力の推定を行う。

（ｉ）手法の概要

課題⑧－１０：各種統計モデルと配電線潮流をと用いた配電-全体系統の太陽光発電出力統計

項目	内容
手法の概要	配電線の潮流と日射量・気温から配電線に連系している PV 出力を推定する。またアップスケーリングモデルにより、広域の PV 出力を推定する。
推定範囲	配電線レベルから
特徴	PV 出力を需要も含めた形で推定する。 アップスケーリングモデルは、上位系統の潮流から下位系統の PV 出力を推定するトップダウン式の推定である。

（ii）評価方法

配電線レベルの狭い範囲の日射観測値は PV300 データにはないなどの理由から、表 3-3-4 のデータにより評価を行った。

表 3-3-4　評価に使用したデータ

項目		使用データ
太陽光発電・日射量データ		NEDO プロ太田市 2006 年 12 月、2007 年 1 月～11 月 PV300 データ 2010 年 11 月 1 日～2011 年 10 月 31 日
需要データ（住宅）		NEDO プロ太田市 2006 年 12 月、2007 年 1 月～11 月
需要データ（工場）	30 分平均値	「電気協同研究　第 66 巻第 1 号　配電系統における力率問題とその対応」 P11 および P97、98 の平均負荷曲線
	30 分以下の変動	三菱電機工場需要 2011 年 11 月～2012 年 6 月

（iii）評価結果

（イ）配電線レベルの太陽光発電出力推定

・対象配電線の受電潮流の成分を分離するため、受電潮流の計測間隔が短いほど推定精度が良くなる。10 分間隔の RMSE が約 6%に対して、1 秒間隔の RMSE が約 4.5%である。

・受電潮流の短周期成分の全てを太陽光発電出力の短周期成分と見なすため、太陽光発電設備容量／最大需要の割合が小さいほど誤差が大きい。100%割合の RMSE が約 4.5%に対して、10%割合の RMSE が約 9%である。

・太陽光発電出力の長周期成分の推定は、数 10km 以上の範囲でも地点間の日射強度相関が高い 1 時間の日射量を使用するため、対象地点から 40km 離れている地点の日射量を利用しても、RMSE が約 11%以下である。

・オフラインとオンラインの推定精度はほとんど変わらない。

（ロ）アップスケーリング

・推定誤差、地点間の日射強度相関、領域数値予報モデルの空間格子間隔、設備/運用のコストを考慮した上で、40km 四方のアップスケーリング集約単位(1 地点を 40km 四方エリアを代表)が適切と考えられる。

（ｃ）誤差要因の分析

全天日射強度（水平面日射強度）から、太陽光発電出力を正確に推定するためには、設置地点の位置、パネルの方位・角度・温度、さらにはパネルの種類や PCS （Power Conditioning Subsystem、パワーコンディショナ）の変換効率ほか様々な入力データが必要である。一方、入力データが少ない方が管理は容易であるため、データを省略の可否が判断できるよう、それぞれの要因が推定誤差に与える影響を調べた。

（ｉ）手法の概要

課題⑧－９：日射量推定結果からの太陽光発電出力把握

項目	内容
手法の概要	それぞれの誤差要因を入力することができる PV 出力推定モデルを作成し、そのモデルにより誤差の影響を評価する。

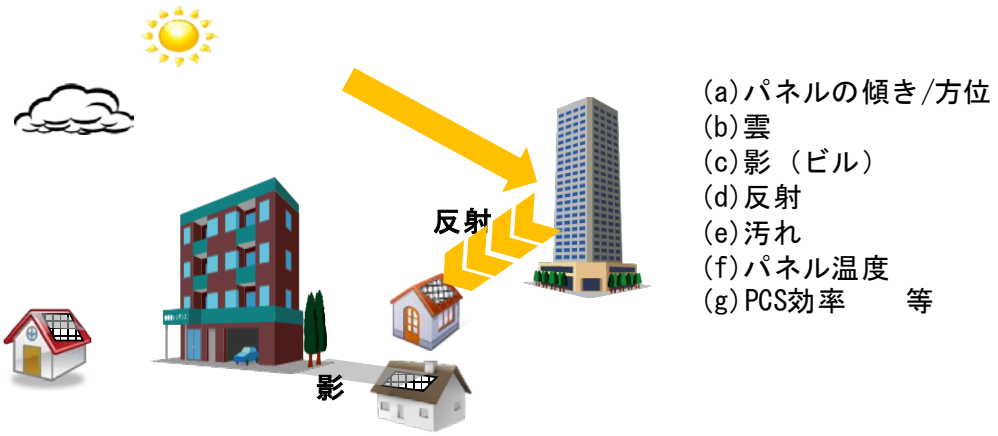


図 3-3-2　ＰＶ出力推定誤差の要因

（ii）推定誤差要因の影響有無

太陽光発電出力推定モデルを作成し、モデルによる推定誤差の影響有無を調べた。結果を表 3-3-5 に示す。

表 3-3-5　推定誤差要因と影響の有無

誤差要因	影響	備考
設置地点の緯度	なし	２度（約 200km）程度であれば、出力の違いが小さい。
設置地点の経度	なし	出力への影響はない。ただし南中時刻は経度により異なるため、最大出力が発生する時刻には注意が必要。
パネルの傾き	あり	傾きにより出力が異なる。
パネルの方位	あり	方位により出力が異なる。
パネルの特性	あり	日射の入力に対し温度・経年・種類により出力が変わる。
PCS	あり	定格より小さい出力ではカタログ値より効率が下がる。
影の影響	なし	個々のパネルでは影響があるが、モデルケースで推定した結果、複数のパネルでは影響が少ない。
パネル面への反射	なし	広範囲に影響することはない。
汚れの影響	なし	定期的に清掃が行われている気象台の観測値と比較しても顕著な違いがない。

（４）日射量の分析

PV300 で設置した日射計のデータを様々な角度から分析し、太陽光発電の大量普及時に太陽光発電電力量の予測や出力を推定する技術の観点から、電力システムの運用という用途・目的に応じて日射量や太陽光発電の発電量データがどの程度の空間密度、計測サンプリングで必要であるかを考察する。また、今後、太陽光発電量の予測・推定を行っていくための計測装置の仕様や配置に関する提言を行う。

（ａ）課題⑧－１２：日射量データ分析によるデータ密度・周期・取得装置配置の検討

課題⑧－１２では、PV300 事業にて設置した日射計データを様々な角度から分析を行った。

（ｉ）電力システム全体の需給調整の視点からの必要変動パラメータの分析

（イ）変動の評価方法検討および評価

・全天日射量の時空間的基礎特性の分析

短時間予測のためのPVの時空間的な変化の性質を把握することを目的に、最先端の数理分析の知見に基づく分析を行った結果、全天日射量の空間分布は、時間的に複雑な依存関係にあることが分かった。そのため、太陽光発電量の予測時には、予測精度を高める点で、部分の予測を積み上げて合計発電量を予測するのではなく、合計発電量自体の予測を行う視点が重要である。

・気象官署データによる合計発電量とPV300 による合計発電量の比較評価

PV300 のデータは蓄積期間がまだ短いため、その代用として、長期に渡りデータが蓄積されている気象官署の日射量データをベースの適用の可能性を検討した。PV300 と PV 発電実績データ（気象官署）による発電量を比較すると概ね PV300 の方が値が大きい結果となった。現状の結果では、PV 発電実績データ（気象官署）を PV300 の代用として直接使用することは厳しい。また PV300 を補間するデータとしては、ramp 現象探索など、大きな気象現象に基づく変動の探索への活用可能性は有している。

・PV300 による発電量、残余需要の基礎特性の分析

PV の発電量把握、予測のニーズを電力システム運用の観点から分析するために、直接的なデータ分析を行った。2010 年度の東京電力管内における電力需要量、太陽光発電量のデータ、および、想定される太陽光発電の導入量に基づいて、系統の発電機が供給する残余需要量モデルによる分析および評価を行った。今回対象とした 2010 年 11 月 1 日～2011 年 3 月 31 日における最大需要日・時刻が 2 月 14 日 17 時と夕刻であり、日射量が非常に小さい時間帯であることが原因で、PV の kW 価値が小さい結果となった。今回の kW 価値は最大需要発生時に PV システムがどの程度の発電出力比率を期待できるかという視点で価値を定義している。従って、今後は通年の解析により再評価する必要がある。

・残余需要の ramp 現象の分析

発電出力の ramp 現象とは、大きな気象の変化により、風力発電や PV の出力が数十分から数時間継続して減少あるいは増加する、 比較的穏やかではあるが、大きな合計発電量の変化現象である。発電出力の ramp 現象は欧米の風力発電システムを中心に大きな運用上の問題として顕在化しており、大停電に至った例も存在する。大きな Ramp 現象は年に数回発生するかしないかの稀な現象ではあるが、電力運用側に非常に厳しい状況を強いる可能性があり、その分析は需要から変動する発電出力を差し引いた残余需要の ramp 解析により検討が行われる。

残余需要の ramp 解析においては、すでに正確な予測対象となっている元需要に比べて残余需要は季節、時間帯に依存し、各電力システムの需要形態や地域に特有な天候のため不規則になり、これからの運用システムはこの残余需要の正確な予測（PV 発電量の予測）が必須といえる。また通常の期待値や変動ばかりではなく、本分析で対象とした ramp 現象の予測も PV 出力予測の重要なポイントである。但し、現状の PV の ramp の解析モデルでは、朝方および夕方の完全に予測可能な ramp が分離されておらず、今後、予測の困難な ramp を対象とする抽出方法や統計計算の方法、例えば継続時間が短いもののみで計算するなど、を考える必要がある。

ramp 現象とは

大きな気象の変化（例えば，前線の通過）により，PV や風力発電の出力，もしくは残余需要（需要から風力発電および PV の出力を差し引いた正味の需要）が数十分から数時間継続して減少あるいは増加する，比較的穏やか（変動の傾きは急激ではない）ではあるが，変動量は大きい現象のことを指す。大きな ramp 現象は年に数回発生するかしないかの稀な現象ではあるが，電力運用側に非常に厳しい状況を強いる可能性があり，欧米の風力発電システムを中心に大きな運用上の問題として顕在化している。

（ⅱ）ならし効果を反映した変動パラメータの評価

（イ）電力システム全体の需給調整の視点からの必要変動パラメータの決定

・ボロノイ分割による電力システムの合計発電出力データの作成

太陽光発電（以下、PV）の電力系統への大量導入時を想定して、電力システムの運用に適用するためには、電力システム全体の太陽光発電データの想定を行うことが必要となる。ポイントは、ならし効果により常時変動が小さくなること、予測精度が向上することが見込まれる点である。

そこで本研究では、時間分解能が 10 秒かつ全国に 321 箇所の計測点を有する PV300 を基にして、電力システムの視点による各種データ分析を行う際に利用する電力システムの合計発電出力データの作成を目的とした。

現在の結果では、計測地点の配置によっては、ボロノイ分割によって大きなエリアを受け持つ地点が存在するため、完全に発電出力を模擬できているわけではない。特に短周期変動などがある地点に重みが集中することが要因である。今後は変動特性という意味ではより精緻な方法が必要となるが、一定の積算データ（時間値データ）など地点間の相関が高い周期における分析には利用できると考えられる。

ボロノイ分割とは

ボロノイ分割は，例えば気象学の分野において，アメダスなどの観測

点における測定値が，どのくらいの領域を代表するデータであるかを解析する際にしばしば用いられる数理的手法である。

数学的には，ある平面上に，任意の位置に複数個の点（母点と呼ばれる）が各々配置された場合を考えた時，この母点がこの平面内で支配する領域を求める（ある平面を分割する）手法がボロノイ分割である。幾何学的には，この領域の境界線は、各々の母点の二等分線の一部になる。母点数が 5 個あった場合、ボロノイ領域は 5 つに分かれ，一般的なボロノイ図では、母点数とボロノイ領域数は一致する。

本プロジェクトでは，PV300 プロジェクトにて設置された日射計の位置が母点となり，その観測点での日射量が代表するエリアがボロノイ領域となる。以下の図は中部電力エリアを描いており，各点が設置された観測点，即ち，日射計の位置（母点），色分けされた区分がその中に含まれる観測点が代表しているエリア（ボロノイ領域）を示す。

（ロ）上記必要変動パラメータに関してならし効果を反映したモデルの評価

・ならし効果を含めた特性の分析

本研究ではならし効果を含めた特性の分析として、あるエリアにおける最大変動幅の分布を推定することを目的とした。今回は 20 分以下の変動周期を対象として、2 点間の相関距離解析による無相関距離の分析を行った。この結果、20 分以下の変動については約 10～30km 以上で無相関距離となることが分かった。ただし、今回は１日ごとにデータの相関分析を行っているため、時間ごとに相関分析するなど改良が必要である。

また、地点数 N と最大変動幅の統計パラメータの関係を求めた。ただし、地点数と最大変動幅の統計的な値（本稿では最大値、最小値）の近似式の検討も重要である。今回は、累乗式を利用したが、ある程度で飽和する指数関数をベースにしたモデルも検討が必要である。

無相関距離を 15km と仮定した場合、東電エリアでは 20 分以下の周期における最大変動幅（20 分窓）の最大最小は約±25W/㎡となった。

３－１－３　特許出願状況等

表 3-4　特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	国際標準への寄与
日射量の把握	3	0	0	0
日射量の予測	3	0	0	0
太陽光発電出力の推定	5	0	0	0
日射量の分析	2	0	0	0
全般	5	0	0	0
計	18	0	0	0

表 3-5　論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	日本太陽エネルギー学会　学会誌「太陽光発電システムの発電出力把握・予測技術の最新動向」	H25.11
	電気学会　論文誌 B(電力・エネルギー部門誌)「日射量、統計モデルと配電線潮流を用いた太陽光発電出力推定に関する研究」	時期未定 審査中
投稿	なし	－
発表	27th European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU-PVSEC27)「ANALYSES OF SOLAR IRRADIANCE DATA FROM DISTRIBUTED OBSERVATION SITES FOR SPATIAL INTERPOLATION」	H24.9
	IEA PVPS「Analysis and Forecast of PV power Variation」	H24.10
	電気学会　電力系統技術研究会「日射観測における日影データの判別方法についての検討」	H25.1
	電気学会　全国大会「太陽光発電量の空間分布の非負分解」	H25.3
	電気学会　全国大会シンポジウム「太陽光発電出力予測技術開発実証事業　太陽光発電出力予測・推定技術の開発」	H25.3
	17th International Conference on Intelligent Systems Applications to Power System, Panel Session「PV output estimation based on solar irradiation and power flow in distribution system」	H25.7
	International Symposium of Nonlinear Theory and its Applications「Complex dynamics of photovoltaic outputs」	H25.9
	電気学会　電力・エネルギー部門大会「太陽光発電出力把握のための日射量推定・予測手法の開発」	H25.8

	題目・メディア等	時期
	日本太陽エネルギー学会　太陽光発電部会　第5回セミナー「気象会社における太陽光発電の出力把握・予測の取組」	H25.8
	日本太陽エネルギー学会　太陽光発電部会　第5回セミナー「配電線潮流データを用いたPV出力推定の研究」	H25.8
	日本太陽エネルギー学会　太陽光発電部会　第5回セミナー「太陽光発電出力把握技術の開発」	H25.8
	日本太陽エネルギー学会　太陽光発電部会　第5回セミナー「太陽光発電出力変化の実態と電力需給運用面からの予測のニーズ」	H25.8
	電気学会　電子・情報・システム部門大会「気象観測データの現状と活用について」	H25.9
	電気学会　電力技術・電力系統技術合同研究会「配電線潮流を用いた太陽光発電出力推定手法の検討」	H25.9
	IEA PVPS「Accuracy evaluation of solar irradiance forecasting technique using a meteorological model」	H25.10
	電気学会　新エネルギー・環境/メタボリズム社会・環境システム合同研究会（テーマ：再生可能エネルギーの発電予測とシステム技術）「数値気象モデルWRFによる様々な時間・空間条件下での日射量予測誤差の評価」	H25.11 予定
特許	なし	ー

３－２　目標の達成度

太陽光発電出力を予測する時期や時間など電力系統の需給運用上のニーズを明確にし、太陽光発電出力の把握に影響のある現象（雲による影、太陽光発電パネルの種類・設置方位・傾き・パネル温度、PCS の変換効率など）を分析して精度向上を行い、実用化の見通しを立てた。

表 3-6　目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
＜日射量の把握＞			
日射量観測データや気象衛星データからの日射量推定（課題⑧－１）	統合日射量データベースを構築する。	気象衛星画像から日射量を推定する手法を、需給運用上のニーズに合うよう改良した。 衛星推定日射量に日射計観測値を用いた誤差補正を行うことで精度向上を図った。	達成
空間線形回帰法（クリギング）に基づく空間補間による日射量推定（課題⑧－２）	リアルタイムの日射量マップの作成を目指し、地球統計学の空間線形回帰法（クリギング）に基づく日射の空間補間法を地域 PV 発電出力把握に適した手法に改良する。	これまでの 10km 四方程度を推定する空間補間法を、電力系統の需給エリアで適用できるよう、面的広がりの大きさの違いによる変動平滑化効果を考慮して改良した。 日射量の空間補間法を元に、気温に関する空間補間を行う技術を開発した。	達成
気象衛星データを用いた日射量推定（課題⑧－３）	水平スケール別・天気パターン別に作成した日射量の評価指標値より、水平スケール別・天気バターン別の日射量推定手法の適用範囲を明確にする。	面的な日射特性の把握に必要な評価指標を選定し、天気区分別やエリアの広さ別等各状態における最大変化幅等を見積もることを可能とした。 衛星画像から推定した面的な日射量（東京大学竹中特任研究員作成）に対し観測値で補正し推定精度を向上する手法を構築した。	達成

要素技術	目標・指標	成果	達成度
＜日射量の予測＞			
時間スケールに応じた日射量予測（課題⑧－４）	日本気象協会保有の数値予報モデル（SYNFOS-3D）や統合日射量データベースなどを用いて日射量予測手法を開発する。	数時間先の予測は気象モデルではなく移動予測手法を用いるなど、予測する時間スケールにより予測手法を変えた。 翌日予測では、気象モデルに統計的手法を組み合わせて、精度の向上を図った。	達成
気象モデルによる日射量の予測（課題⑧－５）	電力中央研究所保有の気象予測・解析システム（NuWFAS）をベースとして、当日・翌日の気温・風速・日射量を予測する。	既開発の気象予測･解析システムを、翌日・当日の日射量を予測するシステムに改良し、予測を行った。	達成
気象予測モデルおよび統計手法を用いた日射量の予測（課題⑧－６）	数値予報データを利用した統計学的手法により日射量を予測するモデルを構築する。	気象庁数値予報データ（GPV）の雲量を入力データとし、統計解析により日射量予測値を出力するモデルを作成した。	達成
＜太陽光発電出力の推定＞			
地域の太陽光発電導入状況に対応した太陽光発電出力推定（課題⑧－７）	地域 PV 導入状況の違いを考慮可能な推定法を検証し、実運用時に地域毎に予め調査が必要な PV 設置状況の要素を整理する。	地域の PV 導入状況に対応した PV 出力推定を可能とする個別 PV の発電出力推定手法の精度評価を行い、出力推定に影響を与える要素（パネルの方位、角度など）を整理した。	達成
統計手法を用いた太陽光発電出力推定（課題⑧－８）	日射量推定・予測値を元に、過去の実測データによる学習および補正などを適用し PV 出力を推定する手法を開発する。	需給計画･運用のニーズに基づき PV 出力を推定する時間・空間解像度を決定した。 PV 出力に大きな影響を与える日影および積雪について、推定精度向上のための評価を行った。	達成

要素技術	目標・指標	成果	達成度
日射量推定結果からの太陽光発電出力推定 （課題⑧－９）	太陽光パネル設置地点の位置、パネルの方位・角度・温度、さらにはパネルの種類や PCS の変換効率ほか様々な要因が、日射量から太陽光発電出力への推定に与える影響を整理する。	PV パネル設置方向と傾きを推定する手法を検討し、ほぼ正しく推定できる見込みが得られた。 PV の出力推定および出力予測アルゴリズムの開発のための誤差要因を分析し、観測地点毎と、複数の観測地点があるエリアのPV出力推定モデルに適用し、精度を確認した。	達成
各種統計モデルと配電線潮流を用いた配電-全体系統の太陽光発電出力推定 （課題⑧－１０）	配電線レベルの広さの PV 出力の推定を行う手法を開発する。	PV 出力と日射量・気温、需要の関係をモデル化するために計測データの分析を行い、相関を求めた。 配電（地域）レベルの PV 出力推定機能の開発を行い、需要モデルを利用することで、精度が上がることを確認した。	達成
統計処理による太陽光発電量推定 （課題⑧－１１）	簡易的な手法により、地域の日射強度から発電電力量を推定する手法を開発する。	簡易な統計手法を用いた発電量推定モデルを構築した。	達成
＜日射量の分析＞			

要素技術	目標・指標	成果	達成度
日射量データ分析（課題⑧－１２）	太陽光発電の大量普及時に、太陽光発電電力量の予測や出力を推定する技術の観点から、用途・目的に応じて日射量や太陽光発電の発電量データがどの程度の空間密度、計測サンプリングで必要であるかを考察する。	PV300 で設置した日射計のデータを様々な角度から分析し、太陽光発電の大量普及時に太陽光発電電力量の予測や出力を推定する技術の観点から、電力システムの運用という用途・目的に応じて日射量や太陽光発電の発電量データがどの程度の空間密度、計測サンプリングで必要であるかを考察するための基礎分析を行った。	達成

４　事業化、波及効果

４－１　事業化の見通し

利用主体となる電力会社が参加することで、日々の需給運用に基づくニーズを反映した、太陽光発電の現在出力の把握や出力予測という新規技術の開発ができた。

ここで開発した新規技術は，各電力会社の需給システムに要素技術として適用され、それぞれの需給システムに応じて開発・導入される見込みである。

また、日射量の予測に関する基礎技術の向上に資するため、太陽光発電事業者あるいは一般の太陽光発電導入者にとってもより的確な将来発電量予測の礎として活用される可能性が見込まれる。

４－２　波及効果

本事業は、電力系統の安定的な需給運用に資することを目的として実施しており、電気事業以外の産業分野へ、開発技術を直接的に展開されていくことは想定しにくい。

しかし、より正確な日射量予測のためには、基礎となる気象予測技術の精度向上が不可欠であることから、気象予報の高精度化に対する強いニーズとなり、幅広い分野へ天気予報高精度化の恩恵があるものと見込まれる。

また、本事業により、正確な太陽光発電の出力把握・出力予測手法が早期に確立できれば、需給バランス確保のために必要なバックアップ電源やすべての需要家における太陽光発電の出力状況の把握が不要となるなど電力設備等の合理化が可能となることが期待される。

さらに、火力設備や蓄電設備の計画的・効率的な運用に資することによって、これら設備の長寿命化や運用コストの低下をもたらす、等の効果も期待できる。

５　研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

５－１　研究開発計画

本事業は、２－１項の研究開発目標を達成すべく、平成 23 年度から平成 25 年度の３ヵ年をかけて実施中である。全体実施計画を表 5-1 に示す。

表 5-1　研究開発計画

実施項目／年度		２３	２４	２５
日射量の把握	データ収集	■	■	■
	手法の開発	■	■	■
	手法の評価	■	■ ■	■ ■
	まとめ	■	■	■
日射量の予測	データ収集	■	■	■
	手法の開発	■	■	■
	手法の評価	■	■ ■	■ ■
	まとめ	■	■	■
太陽光発電出力の推定	データ収集	■	■	■
	手法の開発	■	■	■
	手法の評価	■	■ ■	■ ■
	まとめ	■	■	■
日射量の分析	データ収集	■	■	■
	手法の検討	■	■	■
	分析・考察	■	■ ■	■ ■
	まとめ	■	■	■
報告		▲ 中間報告	▲ 中間報告	▲ 最終報告

５－２　研究開発実施者の実施体制・運営

本事業は、経済産業省資源エネルギー庁電力基盤整備課の公募による選定審査手続きを経て、東京大学・伊藤忠テクノソリューションズ・ソーラーフロンティア・日本気象協会・日立製作所・三菱電機・電力中央研究所・電力 10 社の計 17 法人の共同申請により採択を受けて実施した。

事業の実施にあたっては、技術開発を統括するためのプロジェクトリーダ（東京大学 生産技術研究所 荻本和彦特任教授）のもと、課題担当法人間の連携や事業の進捗管理を行うための事務局を設置し、図 5-1 に示す体制とした。

なお、本事業は、太陽光発電の大量普及に伴う諸課題解決のために実施している「次世代送配電系統最適制御技術実証事業（事務局：東京電力）」「次世代型双方向通信出力制御実証事業（事務局：東京電力）」と連携を図りながら取り組んでいる。

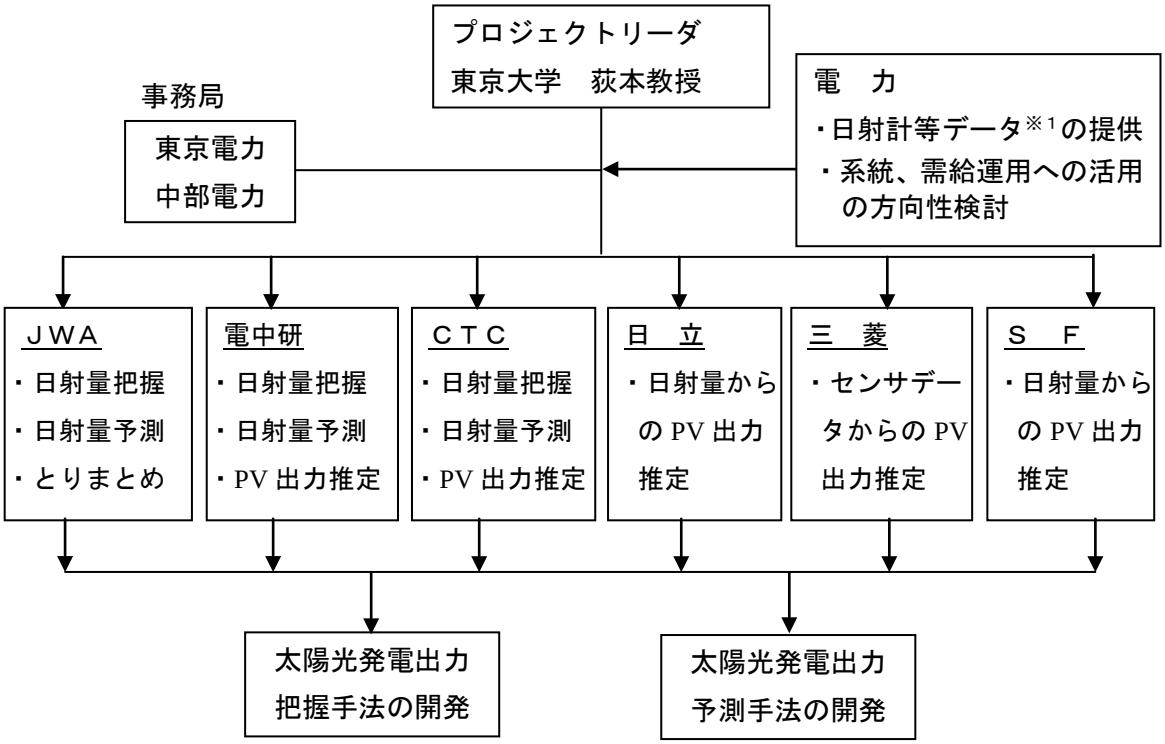


図 5-1　実施体制

凡例　電　力：電力１０社
ＪＷＡ：一般財団法人　日本気象協会
電中研：一般財団法人　電力中央研究所
ＣＴＣ：伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
日　立：株式会社 日立製作所
三　菱：三菱電機株式会社
Ｓ　Ｆ：ソーラーフロンティア株式会社

※１　分散型新エネルギー大量導入促進系統安定対策事業で設置し

た各種センサのデータ

５－３　資金配分

事業に係る経費は、課題を担当する各法人からの見積に基づき事前にヒアリングを実施して予算配分を行った。経済産業省からの補助金については、補助金交付要綱に則った手続きにより確定検査を経て確定した。

表 5-2　資金配分　（単位：千円）

実施個所／年度	２３（実績）	２４（実績）	２５（計画）	合計
東京大学 ・日射量データ分析によるデータ密度・周期・取得装置配置の検討（課題⑧－１２）	164	480	500	1,144
伊藤忠テクノソリューションズ ・気象衛星データを用いた日射量推定（課題⑧－３） ・気象予測モデルおよび統計手法を用いた予測（課題⑧－６） ・統計手法を用いた太陽光発電出力変換手法の構築（課題⑧－８）	29,739	4,607	2,485	36,830
ソーラーフロンティア ・統計処理による発電量推定（課題⑧－１１）	3,686	1,500	1,499	6,686
日本気象協会 ・日射量推定の精度向上および太陽光発電出力把握に向けた検討（課題⑧－１） ・時間スケールに応じた日射量予測手法の開発および太陽光発電量予測に向けた検討（課題⑧－４）	38,721	20,917	4,893	64,531
日立製作所 ・日射量推定結果からの太陽光発電出力把握（課題⑧－９）	4,032	1,774	1,900	7,706
三菱電機 ・各種統計モデルと配電線潮流を用いた配電−全体系統の太陽光発電出力推定（課題⑧－１０）	3,539	3,179	2,099	8,817
電力中央研究所 ・空間線形回帰法（クリギング）に基づく空間補間による日射量推定（課題⑧－２） ・気象モデルによる予測（課題⑧－５） ・地域の太陽光発電導入状況に対応した太陽光発電出力推定（課題⑧－７）	4,481	4,066	4,082	12,629
電力１０社 ＜日射計等データ収集＞	2,714	14,166	15,540	32,420
合計	87,077	50,688	32,999	170,763

※掲載の数値は四捨五入しているので合計が合わない場合があります

５－４　費用対効果

系統安定化対策の観点から精緻な太陽光発電の出力把握・予測手法の確立が期待されているなかで手法確立に必要な新規技術の開発を行ったところ、利用主体となる電力会社の参加により、開発した技術は日々の需給運用に基づくニーズを反映した実効性あるものとなった。

また、事業を進めるうえでの研究課題は、各々の参加事業者がもつ強みを活かすことができるものを設定したが、全体会議やワーキンググループの実施により事業者同士の連携を図るなど、事業運営を効率的かつ効果的に行った。

将来的には、「４－２　波及効果」の項でも述べたように、正確な太陽光発電の出力把握・出力予測手法の確立により電力設備等の合理化が可能となり、電力設備の長寿命化や運用コストの低下も期待される。

５－５　変化への対応

本事業は、安定的な電力供給の確保に資するために電力 10 社が参加して需給運用ニーズを反映させた技術開発を行った。しかし、評価・検証に用いた日射データ等は３年程度の実績しかなく、開発した技術が当該期間の気象に基づいているおそれがあるため、今後さらに複数年の気象データを用いて評価することにより、開発技術の汎用性を確認する。

第４章　技術に関する施策評価

第４章　技術に関する施策評価

１．施策の目的・政策的位置付けの妥当性

（１）施策の目的の妥当性

原子力発電の将来性が不透明な現状では、再生可能エネルギーの本格的導入に先立ち、火力発電設備の高効率化及び環境負荷の低減化は不可欠の技術課題であり、その意味においても本施策の目的の妥当性は明らかである。また、上述のように諸情勢が大きく変化する中で、安定供給を確保し、温室効果ガスの排出抑制を進めるためには、電力供給システムの技術向上を図ることが極めて重要であり、目的の妥当性は高い。

なお、全てが即座に国内外に適用できるものであるかは、疑問があるところ。現在取り組んでいる技術・研究が、どういった条件・環境において、その成果を発揮するのか、あるいはどういった条件が成立したときに経済的有利になるか、そして具体的な適用先・時期についてはどういった考え方なのか（どういった仮説を設定しているのか）、条件を明確にする必要があると考える。

（２）施策の政策的位置付けの妥当性

本施策の位置付けは、2013 年の「日本再興戦略」にも合致するもので、火力発電技術の高効率化と効率的なエネルギー流通技術の開発に関して、世界の中で主導的役割を果たしてきた我が国の開発・研究スタンスを一層確固たるものにする効果が期待できる。これにより国際的な施策動向を我が国が先導する立場に立てる可能性がある。

また、環境エネルギー技術革新計画に基づき、中長期的な技術ロードマップを見据えた上で背景や我が国の技術開発の動向・課題を整理し計画されており妥当と考える。

更に、国内はもちろんのこと、電力分野における日本発の最先端技術を海外に展開し、エネルギー問題や温暖化対策等で貢献していく姿もしっかり示されており妥当であると考える。

なお、ライフサイクルコストを踏まえた検討も加えれば、より適用先が明確になると考える。そこに何らかの課題がある場合はそこを明確にした上で整理し、将来の技術開発につなげる仕組みが必要でないか。

（３）国の施策として妥当であるか、国の関与が必要とされる施策か。

本施策のような電力・エネルギー関連分野は、長期にわたる研究開発期間と多額の資金を必要とするもので、その事業化を考えても、国として取り組むべき施策であると考える。また、本施策はエネルギー政策上、重要な施策であり、関連する産業・企業が多く、また、海外への事業展開が可能な分野でもあることから、国が積極的に関与する必

要があると考えられる。
なお、一部に国が関与するには、まだ時期尚早の技術もある。

（１）施策の目的の妥当性

【肯定的意見】

・我が国の電力基盤整備のみならず、産業政策面からも高効率火力発電技術は重要であり、太陽光発電の普及に伴う電力基盤への影響評価と対策に関する技術開発も重要であり本施策の目的は極めて妥当である。

・原子力発電の将来性が不透明な現状では、再生可能エネルギーの本格的導入に先立ち、火力発電設備の高効率化及び環境負荷の低減化は不可欠の技術課題であり、その意味においても本施策の目的の妥当性は明らかである。火力発電技術開発、送配電技術開発ともに概ね技術課題の整理は終了しており、具体的目標や日程についても明確に提示されており妥当と考える。いずれの事業も実用化・事業化を見据えた内容となっている。

・諸情勢が大きく変化する中で、安定供給を確保し、温室効果ガスの排出抑制を進めるためには、電力供給システムの技術向上を図ることが極めて重要であり、目的の妥当性は高い。

・施策の目的については、明確になっている。

【問題点・改善すべき点】

・原子力発電に関する方針等、国家の政策が不明確な状況であるといった、本施策を取り巻く環境が不透明・不安定であることが懸念される。

・特に大きな問題点は見当たらないが、個々の技術において技術的課題の整理と具体的な目標設定にばらつきが認められる。

・施策の目的はおおむね妥当だが、最新の状況を反映して実施方法等を一部修正する必要があるケースも見受けられる。

・全てが即座に国内外に適用できるものであるかは、疑問があるところ。現在取り組んでいる技術・研究が、どういった条件・環境において、その成果を発揮するのか、あるいはどういった条件が成立したときに経済的有利になるか、そして具体的な適用先・時期についてはどういった考え方なのか（どういった仮説を設定しているのか）、条件を明確にする必要があると考える。

（２）施策の政策的位置付けの妥当性

【肯定的意見】

・高効率火力発電及び超伝導技術については環境エネルギー技術革新計画にロードマップが示されており明確で妥当である。送配電技術についてもおおむね妥当である。

・自然エネルギー導入と効率改善による CO2 排出量削減は喫緊の課題である。
・エネルギー安全保障や地球環境問題への対応などから、火力発電の一層の高効率化や、再生可能エネ発電の大量導入を見据えての電力供給システムの高度化など、施策の目的・政策的位置付けは明確である。
・本施策の位置付けは、2013 年の「日本再興戦略」にも合致するもので、火力発電技術の高効率化と効率的なエネルギー流通技術の開発に関して、世界の中で主導的役割を果たしてきた我が国の開発・研究スタンスを一層確固たるものにする効果が期待できる。これにより国際的な施策動向を我が国が先導する立場に立てる可能性がある。
・火力発電及び送配電の技術向上は、エネルギーコストの低減、供給安定性の向上、環境性の向上などにつながる。また、本年度の技術研究事業の多くは我が国が優位性を持つ分野であり、関連事業の国際展開を図る上でも重要な施策と考えられる。よって妥当性は高い。
・環境エネルギー技術革新計画に基づき、中長期的な技術ロードマップを見据えた上で、背景や我が国の技術開発の動向・課題を整理し計画されており妥当と考える。また、国内はもちろんのこと、電力分野における日本発の最先端技術を海外に展開し、エネルギー問題や温暖化対策等で貢献していく姿もしっかり示されており妥当であると考える。

【問題点・改善すべき点】
・次世代型双方向通信出力制御実証事業と太陽光発電出力予測技術開発実証事業について、評価用資料において政策的位置付けに関する記述が不明確。原子力発電に関する方針等、国家の政策が不明確な状況であるといった、本施策を取り巻く環境が不透明・不安定であることが懸念される。
・シェールガス革命によるエネルギー資源需給動向変化や、新たに策定された我が国のGHG（Green House Gas：温室効果ガス）削減目標、発送電分離などの電気事業制度改革などの情勢変化に対応した検討の必要性がある。
・政策的位置付けについては妥当であり、問題点や改善すべき点は認められない。
・ライフサイクルコストを踏まえた検討も加えれば、より適用先が明確になると考える。そこに何らかの課題がある場合は、そこを明確にした上で整理し、将来の技術開発につなげる仕組みが必要でないか。
・次世代型双方向通信出力制御実証事業に関連して、供給側の出力制御だけでなく、負荷側の通信制御も加味すべきである。
・太陽光発電出力予測において予測が外れた場合、同じことは風力発電にも言えるが、次世代双方向通信制御で電力を制限すればよい。また、揚水発電とか、負荷側調整など電力システム全体で対処するのであまり必要性があるとは思えない。

（３）国の施策として妥当であるか、国の関与が必要とされる施策か。

【肯定的意見】

・高効率火力発電については投資回収まで期間が長いことなどを考慮すると民間のみでは技術開発の早期進展が必ずしも期待できず、国の積極的な関与が必要。送配電技術については、公共財である電力基盤のあり方に直結する問題であり、やはり国の積極的な関与が必要である。
・国際競争力を付ける上でも重要なテーマであり、国の関与が必要である。
・ガスタービンや石炭火力などの熱効率を世界最高レベルとし、プラント運用性向上にも貢献する技術開発は我が国技術の海外展開を支援する上からも必要不可欠である。
・本施策のような電力・エネルギー関連分野は、長期にわたる研究開発期間と多額の資金を必要とするもので、その事業化を考えても、国として取り組むべき施策であると考える。
・エネルギー政策上、重要な施策であり、関連する産業・企業が多く、また、海外への事業展開が可能な分野でもあることから、国が積極的に関与する必要があると考えられる。
・上記（１）の目的がある場合は、民間主導では難しい。特に、現在の環境は異なるが、将来の環境変化を踏まえた技術開発は、民間主導では難しく、まさしく、国の関与が妥当な施策であると考える。

【問題点・改善すべき点】

・一部に国が関与するには、まだ時期尚早の技術もある。

２．施策の構造及び目的実現見通しの妥当性

（１）現時点において得られた成果は妥当か。

一部のプロジェクトはすぐに活用に至らないものもあるが、国内外の情勢変化に対応できるように開発が行われている。また、いずれの技術分野においても当初設定された計画通り、あるいは、計画を上回る成果が得られている。

なお、震災以降、電力供給システムをめぐる環境は大きく変化し、リスクの捉え方も異なってきている。本案件に置き換えれば、高効率火力発電に対する期待は、従前より大きくなっており、技術開発については、より加速する必要があると考える。また、一部の技術において、情報不足のため、成果の妥当性が評価できないものがある。

（２）技術に関する施策の目的を実現するために技術に関する事業（プロジェクト等）が適切に配置されているか。

火力発電技術開発と送配電技術開発が適切に配置されている。火力発電技術に関しては、大容量機と中小容量機の 2 つの側面から事業が進展しており、既に実施期間が終了

している IGCC（Integrated coal Gasification Combined Cycle：石炭ガス化複合発電）を含めて、また、いずれもの分野においても着実に成果が上がっていることから、配置は適切であると考える。

なお、送配電技術開発については、さらなる事業の追加等による施策の拡充が期待される。また、電源を含めた電力供給システムを巡る環境の大きな変化を踏まえた場合、事業配置の見直し評価が期中であっても良かったのではないか。

（１）現時点において得られた成果は妥当か。

【肯定的意見】

・各個別事業は目標を達成しており、施策の目的・位置付けも妥当であることから、十分な成果を得られている。
・一部のプロジェクトはすぐに活用に至らないものもあるが、国内外の情勢変化に対応できるように開発が行われている。
・1700℃級ガスタービン技術開発では、その成果が1600℃級ガスタービンの実用化に既に反映されるなど、妥当な成果が得られている。
・事後評価の 2 技術に関しては十分な成果が得られ、具体的目標も達成しており十分に評価できる。中間評価の技術に関しても、現時点までに得られた成果は妥当であり、今後の展開が期待できる。
・いずれの技術分野においても当初設定された計画通り、あるいは、計画を上回る成果が得られている。
・「当初計画に基づいて」という判断であれば概ね妥当。

【問題点・改善すべき点】

・「研究開発の目標」として、「・・・手法を開発する」との記述が見られるが、目標を示す表現として曖昧なため、成果として必要とされる技術レベルや精度が得られているかが評価できないケースがある。
・おおむね妥当であるが、送配電技術開発の一部の技術において成果、予算、スケジュールの妥当性が判断できない。
・震災以降、電力供給システムをめぐる環境は大きく変化し、リスクの捉え方も異なってきている。本案件に置き換えれば、高効率火力発電に対する期待は、従前より大きくなっており、技術開発については、より加速する必要があると考える。

（２）技術に関する施策の目的を実現するために技術に関する事業（プロジェクト等）が適切に配置されているか。

【肯定的意見】

・今後重要となる高効率火力発電は要素技術開発と実証とを行い、送配電系統において

重要となる太陽光発電対策に関する事業も実施されているなど、各事業の配置は適切である。

・必要に応じて大学やその他研究機関への研究委託や、省庁間の連携が図られている。

・火力発電技術開発と送配電技術開発が適切に配置されている。火力発電技術に関しては、大容量機と中小容量機の 2 つの側面から事業が進展しており、既に実施期間が終了している IGCC を含めて、配置は適切であると考える。

・いずれもの分野においても着実に成果が上がっていることから、適切に配置されていると評価できる。

・「当初計画に基づいて」という判断であれば、計画通り進捗しておりおおむね妥当。

【問題点・改善すべき点】

・我が国の経済情勢を考慮するとやむを得ないのかもしれないが、送配電網の高度化については、さらなる事業の追加等による施策の拡充が期待される。

・おおむね妥当であるが、送配電技術開発の一部の技術が、他の技術と比べて、同等とは判断できない配置があると考える。

・電源を含めた電力供給システムを巡る環境の大きな変化を踏まえた場合、事業配置の見直し評価が期中であっても良かったのではないか。

３．総合評価

東日本大震災によって明らかになった既存の電力供給システムの問題、原子力情勢の変化、国際資源情勢の変化、地球環境問題の深刻化などを考慮すると、電力供給システムの技術向上を図ることは国の施策上極めて重要な課題と考えられる。中でも、火力発電、送配電に関わる技術開発は、エネルギーコストの低減、供給安定性の向上、環境性の向上などにつながる上に、日本の優位性を高め、事業の国際展開を容易にするといった効果も期待できる。本年度の対象事業は、火力発電の高効率化に関わる技術開発分野を中心に、設定された目的に関して、計画通り、あるいは、計画を上回る成果を上げており、高く評価できる。

なお、事業開始以降に事業目的の前提となる状況に変化が生じた場合は、事業の内容や実施方法を適時修正すべきである。また、計画時点に比較して、本技術に対する社会の期待はより大きくなるなど、社会環境の変化が大きい時代である。そういった時代の中で、必要に応じて研究を加速・減速できる（させる）仕組みが必要であると考える。

【肯定的意見】

・施策の目的・位置付けは妥当であり、十分な成果も得られている。高効率火力発電については我が国の電力基盤のみならず、経済成長にとっても重要。送配電については再生可能エネルギー普及を考慮した電力基盤の構築のためにも重要である。
・国際的な競争力を高める成果が得られている。
・全体として我が国のエネルギー情勢や地球環境問題をめぐる動向を踏まえた施策の目的､政策的位置付けがなされている。
・火力発電技術開発及び送配電技術開発ともに、目的が明確に提示され、着実に研究・開発が進展している。施策の目的、妥当性、期間、予算に関してもおおむね妥当であると考える。
・東日本大震災によって明らかになった既存の電力供給システムの問題、原子力情勢の変化、国際資源情勢の変化、地球環境問題の深刻化などを考慮すると、電力供給システムの技術向上を図ることは国の施策上極めて重要な課題と考えられる。中でも、火力発電、送配電に関わる技術開発は、エネルギーコストの低減、供給安定性の向上、環境性の向上などにつながる上に、日本の優位性を高め、事業の国際展開を容易にするといった効果も期待できる。本年度の対象事業は、火力発電の高効率化に関わる技術開発分野を中心に、設定された目的に関して、計画通り、あるいは、計画を上回る成果を上げており、高く評価できる。
・「当初計画に基づいて」という判断であればおおむね妥当。

【問題点・改善すべき点】

・さらなる予算措置を含めた施策の拡充も期待したい。
・シェール革命による世界のエネルギー資源需給動向などの変化や、新たに策定された我が国の温暖化効果ガス削減計画などの情勢変化に対する各技術の位置付けを再評価すべき。
・特に大きな問題点や改善すべき点は見当たらないが、個々の技術において技術的課題の整理と具体的な目標設定、期間などにばらつきが認められる。
・成果、目標の達成度について、達成に至るまでの過程で問題や課題が生じていた場合は、その内容や対処状況なども報告すべきである。
・事業開始以降に事業目的の前提となる状況に変化が生じた場合は、事業の内容や実施方法を適時修正すべきである。
・計画時点に比較して、本技術に対する社会の期待はより大きくなるなど、社会環境の変化が大きい時代である。そういった時代の中で、必要に応じて研究を加速・減速できる（させる）仕組みが必要であると考える。

第５章　技術に関する事業評価

第５章　技術に関する事業評価

Ａ．高効率ガスタービン技術開発事業

A1.1700℃級ガスタービン技術開発事業

（総合評価）

多くの技術的課題を克服して 1700℃級ガスタービン実用化に向けた多くの成果を得るとともに、数多くの技術的知見を得て、当該分野の発展に大きく寄与したことは高く評価できる。特に本事業の開発成果は、関西電力姫路第二発電所に設置された世界最高温度レベルである 1600℃級ガスタービンに導入され、技術的成果、目標の達成度は十分実証されている。

なお、成果、目標の達成度について、全て「達成」と説明されているが、達成に至るまでの過程で問題や課題が生じていた場合は、その内容や対処状況なども報告すべきである。また、高効率化とともに保守合理化によるコスト低減も視野に入れて対応するとともに、現在ある、1300℃及び 1500℃級のガスタービン発電での課題について明確にした上で、その課題に対して、どのような技術進歩・改良を行っているか明確にする必要があると考える。

【肯定的意見】

・目標は達成されている。
・開発成果が 1600℃級に活かされた。
・シェールガス革命による非在来型天然ガスの埋蔵量は年々増大しており、天然ガスの資源制約論は影を潜めている。地球環境問題への対応や高効率発電技術開発の観点からもガスタービンの高温化による高効率化は極めて重要であり、本事業の目的・政策的位置付けは明確である。
・本事業の開発成果は、関西電力姫路第二発電所に設置された世界最高温度レベルである 1600℃級ガスタービンに導入され、技術的成果、目標の達成度は十分実証されている。
・事業の実施に当たっては、産学連携及び文部科学省と経済産業省の省庁連携も良く図られている。
・多くの技術的課題を克服して1700℃級ガスタービン実用化に向けた多くの成果を得るとともに、数多くの技術的知見を得て、当該分野の発展に大きく寄与したことは高く評価できる。得られた多くの知見は、材料工学、燃焼工学、流体工学、伝熱工学をはじめとする機械工学関連各分野の発展に大きく貢献するものと考える。実用化技術開発に向けて、定常性能の評価のみならず、安定作動領域の拡大やその能動制御など、非定常現象や特異現象の解明と制御に関する研究も積極的に展開しており、高く評価できると考え

る。今後の発展が大きく期待できる。
・主要国が技術開発にしのぎを削るガスタービンの高温燃焼による高効率化で、我が国は世界をリードしているが、当技術開発の成果を活用して、現時点で世界最高効率の1600℃級ガスタービンを実用化し、すでに内外で事業成果を挙げている点はとても高く評価できる。また、これまでの成果をもとに効率目標を引き上げた点も評価できる。
・技術開発の進展や1600℃級ガスタービンの実績を踏まえ、目標効率を56%から57%へと改めるなど、高効率化を目指して積極的に実施しているところは評価できる。
・実用化へとつながったのが良かった。天然ガス発電の更なる高効率化は米国のシェールガス開発成功と相まって大きな流れである。その天然ガス発電の高度化に早期に着手したことは大成功である。必要な開発項目も広く素晴らしい成果である。

【問題点・改善すべき点】
・引き続き事業の積極的な推進を期待する。
・目的を達成しており、事後評価として問題点、改善点は認められない。
・成果、目標の達成度について、全て「達成」と説明されているが、達成に至るまでの過程で問題や課題が生じていた場合は、その内容や対処状況なども報告すべきである。
・高効率化とともに保守合理化によるコスト低減も視野に入れて対応すべきである。
・現在ある、1300℃及び1500℃級のガスタービン発電での課題について明確にした上でその課題に対して、どのような技術進歩・改良を行っているか明確にする必要があると考える。

A2.高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発事業

（総合評価）

高湿分空気を利用してシングルサイクル発電の高効率化を図る実証技術は、全く未知であった分野に積極的に挑戦して、0.3万kW級実証試験及び4万kW級試験で着実に成果を挙げており、これまでの進捗状況は高く評価できる。短期間でこれほどまで実証試験が遂行され、高湿分空気の圧縮機、熱交換器、燃焼器、冷却翼に対する影響が詳細に調査され、貴重な実験データも蓄積された。開発・研究のスピードも迅速であり、液滴工学や微粒化技術、その関連分野の急速な発展も誘起した。本技術は同規模のコンバインド発電と比較して、高い効率が安価で得られることが期待できる。10万kW程度の中小容量発電の実用化技術として、今後の成果や実証が望まれる。

また、本事業が実用化されれば、国内で中小容量機の新増設やリプレースやスマートエネルギーシステムの中核発電機などとしての新規導入が期待され、海外でも幅広い国・地域に展開が期待できる有望技術と考えられる。

なお、予想される用途、設置条件、経済条件などを勘案すると、国内外で事業展開を図るためには、報告書で説明された内容に加え、小型化・省スペース化、メンテナンス性の向上、コストなどが課題になると思われる。より高い事業成果につなげるため、これらの目的に関する技術開発及び成果についても報告すべき。

また、本技術は、現在の延長で考える条件下では、経済的な有利性・効果に疑問が生じる。どういった条件・環境になった場合、本技術開発が有益なのか・経済的なのか、適用できるのか、前提条件を十分に示した上で、その条件の評価を含めた全体評価を行う必要があると考える。また、研究開始前と現在との条件の変化も含めた自己評価をすべき。

【肯定的意見】

・目標は達成されている。
・日本発の技術であり、開発の意義は大きい。
・蒸気タービンを用いないガスタービンシステムで、従来のCCGT(Conbined Cycle Gas Tur-bine：コンバインドサイクルガスタービン)と同等の高い熱効率を得られる10万kWの中小容量機に対するニーズは、ことに再生可能エネ発電の導入進展に伴い高まることが予想される。再生可能エネ発電のバックアップ電源の役割を担う火力発電には、起動・停止時間の短縮など、一層のプラント運用性向上が求められていることや、また部分負荷運転時間が長くなっていることなどを考慮すると、AHAT（Advanced Humid Air Turbine：高湿分空気利用ガスタービン）システムの実用化に対する期待は大きい。
・0.3万kW級実証機による成果を踏まえ、4万kW級実証機による総合試験を行い、AHATシステムの各主要構成機器の性能確認やシステムとしての成立性が実証されている。
・高湿分空気を利用してシングルサイクル発電の高効率化を図る実証技術は、全く未知で

あった分野に積極的に挑戦して、0.3万kW級実証試験および4万kW級試験で着実に成果を挙げており、これまでの進捗状況は高く評価できる。 短期間でこれほどまで実証試験が遂行され高湿分空気の圧縮機、熱交換器、燃焼器、冷却翼に対する影響が詳細に調査され、貴重な実験データも蓄積された。開発・研究のスピードも迅速であり、液滴工学や微粒化技術、その関連分野の急速な発展も誘起した。 本技術は同規模のコンバインド発電と比較して、高い効率が安価で得られることが期待できる。10万kW程度の中小容量発電の実用化技術として、今後の成果や実証が望まれる。

・日本独自の技術である点、中小容量機でコンバインドサイクル型をしのぐ高効率発電を実現でき、負荷追従性能が優れている点などがとても高く評価できる技術開発分野であり実用化されれば、国内で中小容量機の新増設やリプレースやスマートエネルギーシステムの中核発電機などとしての新規導入が期待され、海外でも幅広い国・地域に展開が期待できる有望技術と考えられる。

すでに内外の学会や事業会社によって高く評価されており、当技術開発の成果の一部がガスタービンの高効率化に実用化されている点も高く評価できる。

・中小容量機の効率化・運用性改善の観点から、高湿分空気利用ガスタービンシステム等の新しいシステムの開発は有効である。また、将来のある条件化で活用できる技術開発として、国の主導で進める点に、大きな意義を感じる。

・小型１０万ｋW程度の高効率ガスタービンは無電化僻地用マイクログリッドに不可欠であるがこれはその例であろう。また、天然ガスは世界中に広く、偏在することなく埋蔵されており、米国シェールガスの開発が可能になったのも後押しをした。日本のオリジナルな技術であることから実証化、商品化までつなげる開発計画を立ててほしい。

【問題点・改善すべき点】

・引き続き事業の積極的な推進を期待する。

・大きな問題点は認められないが、開発の速度が速く、高湿分空気によって引き起こされる諸現象の把握と対策に十分時間が取られているのか疑問である。

・予想される用途、設置条件、経済条件などを勘案すると、国内外で事業展開を図るためには、報告書で説明された内容に加え、小型化・省スペース化、メンテナンス性の向上、コストなどが課題になると思われる。より高い事業成果につなげるため、これらの目的に関する技術開発及び成果についても報告すべき。

・ターゲット市場をより絞り込むなど、商用化につながる技術開発をすべき。

・本技術は、現在の延長で考える条件下では、経済的な有利性・効果に疑問が生じる。どういった条件・環境になった場合、本技術開発が有益なのか・経済的なのか、適用できるのか、前提条件を十分に示した上で、その条件の評価を含めた全体評価を行う必要があると考える。また、研究開始前と現在との条件の変化も含めた自己評価をすべき。

・実地での先行的試験運転がほしいがそれは次の実証試験につなげる。

・この開発ではないが開発期間が長すぎると技術の継承が問題。短工程の方が事故が少ない例もある。

Ｂ．高効率ガスタービン技術実証事業

B1.1700℃級ガスタービン技術実証事業

（総合評価）

1600℃級ガスタービン（J形）で培った技術をベースとして1700℃級の実証を行う事業であるが、その前半の4年間で要素技術開発を行う計画であり、技術的課題を着実に整理・解決しながら開発を行っていく姿勢は高く評価できる。特にTBC（Thermal Barrier Coating：遮蔽コーティング）技術、非定常計測に基づく不安定燃焼の制御技術、特殊計測技術などは世界に誇れる日本の革新的技術となるだけでなく、この開発過程において解決される技術的課題は、関連学問分野を大きく牽引することが期待できる。

1700℃級ガスタービンの実用化技術開発では、送電端効率56%（HHV（Higher Heating Value：高位発熱量））という高い目標を設定していたが、研究開発が順調に進展し、実証事業では更に高い効率に目標を設定し直し、挑戦的開発が続いている。各種試験結果が定量的に評価されてきた成果であると考える。

経済性にも優れ､将来的には石炭や固体バイオマス燃料をガス化することで､例えばIGCCの主機としての適用も期待される技術で、事業として早い完成が期待される。

また、超高効率ガスタービンに係る技術分野では、日本企業が素材の開発・加工から、部品・部材の設計・製造、プラントの設計・施工・運営の各分野で世界をリードしているが、1700℃級ガスタービンを諸外国に先駆けて実用化できれば、極めて大きな事業成果につなげることができると考えられる。また、各要素技術の開発が計画通り順調に進んでおり、高く評価できる。

更に、高効率ガスタービンは、今後の火力発電効率化の鍵を握る主要技術であるとともに、環境負荷低減につながる技術でもある。実証事業の加速化も視野に入れて対応すべき。

なお、送電端効率57%（HHV）という非常に挑戦的な目標を定めているので、実証事業で予期せぬトラブルの発生により、研究・開発速度の遅れが危惧される。実証機の開発と製造及びその実証試験で十分なデータを取得するのに、5年間の実施期間で十分であるか疑問がある。

また、実用化技術開発段階での目標（送電端効率56%）に比べて、1%高い目標設置を可能とした技術的根拠を明らかにすべき。

成果、目標の達成度について、全て「達成」と説明されているが、達成に至るまでの過程で当初想定されていなかった問題点や課題が生じていた場合は、その内容や対処状況なども報告すべき。

保守コスト低減に向けた取組みも必要。実際に運用するにあたっては、取替基準等の評価が課題となるため、高温部品の損傷・劣化機構の解明と余寿命評価、保守管理手法等に関する開発も視野に入れて対応すべき。

【肯定的意見】
・目標は達成されている。
・海外メーカーに対して優位性がある。
・1600℃級ガスタービンを用いたプラントにおける実運用を踏まえ、1700℃級を実証するために必要な個別要素技術開発項目が設定されている。
・事業開始2年目として、妥当な成果が得られている。
・1600℃級ガスタービン（J形）で培った技術をベースとして1700℃級の実証を行う事業であるが、その前半の4年間で要素技術開発を行う計画であり、技術的課題を着実に整理・解決しながら開発を行っていく姿勢は高く評価できる。特にTBC（Thermal Barrier Coat-ing：遮蔽コーティング）技術、非定常計測に基づく不安定燃焼の制御技術、特殊計測技術などは世界に誇れる日本の革新的技術となるだけでなく、この開発過程において解決される技術的課題は、関連学問分野を大きく牽引することが期待できる。
1700℃級ガスタービンの実用化技術開発では、送電端効率56%（HHV：Higher Heat Value　高位発熱量）という高い目標を設定していたが、研究開発が順調に進展し、実証事業では更に高い効率に目標を設定し直し、挑戦的開発が続いている。各種試験結果が定量的に評価されてきた成果であると考える。
経済性にも優れ、将来的には石炭や固体バイオマス燃料をガス化することで、例えばIGCCの主機としての適用も期待される技術で，事業として早い完成が期待される。
・超高効率ガスタービンに係る技術分野では、日本企業が素材の開発・加工から、部品・部材の設計・製造、プラントの設計・施工・運営の各分野で世界をリードしているが、1700℃級ガスタービンを諸外国に先駆けて実用化できれば、極めて大きな事業成果につなげることができると考えられる。
各要素技術の開発が計画通り順調に進んでおり、高く評価できる。
・高効率ガスタービンは、今後の火力発電効率化の鍵を握る主要技術であるとともに、環境負荷低減につながる技術でもある。実証事業の加速化も視野に入れて対応すべき。
・目標の設定が良かった。天然ガス発電の更なる高効率化は米国シェールガス開発成功と相まって大きな流れである。これを早くから着手したことは大成功である。

【問題点・改善すべき点】
・引き続き事業の積極的な推進を期待する。
・評価時期が尚早である。
・1700℃級というこれまで経験したことのない温度レベルにおける高温部材のメインテナンスは、プラントを運用する側からは極めて重要な課題である。高温部品の耐久性など保守の面からの検討も是非実施して欲しい。
・送電端効率57%（HHV）という非常に挑戦的な目標を定めているので、実証事業で予期せぬトラブルの発生により、研究・開発速度の遅れが危惧される。実証機の開発と製造及

びその実証試験で十分なデータを取得するのに、5年間の実施期間で十分であるか疑問がある。

また、実用化技術開発段階での目標（送電端効率56%）に比べて、1%高い目標設置を可能とした技術的根拠を明らかにすべき。

・成果、目標の達成度について、全て「達成」と説明されているが、達成に至るまでの過程で当初想定されていなかった問題点や課題が生じていた場合は、その内容や対処状況なども報告すべき。

・保守コスト低減に向けた取組みも必要。実際に運用するにあたっては、取替基準等の評価が課題となるため、高温部品の損傷・劣化機構の解明と余寿命評価、保守管理手法等に関する開発も視野に入れて対応すべき。

・現在ある、1300℃級及び1500℃級のガスタービン発電技術での課題について明らかにした上で、その課題に対して、実証事業において、どのように反映し、その結果がどうであるか明確にする必要がある。

Ｂ．高効率ガスタービン技術実証事業

B2.高湿分空気利用ガスタービン技術実証事業

（総合評価）

現在までに0.3万kW級実証試験及び4万kW級試験装置を用いてデータの取得と実証試験を行ってきた経緯があり、最終的な目標である10万kW級の中小容量機の高効率化実証に向けて準備は整っていると考える。ただし、実用化に向けて必要となる技術課題は依然として多く残されており、それを平成27年度までの期間に集中して行い、その後、実証試験に移るという計画もおおむね妥当であると考える。

本事業の実用化段階では、既設の同容量機と比して10%程度も高い効率の実現が期待できるため、我が国における需要は高く、費用対効果も極めて高いと考える。

また、本事業は将来的に水素燃焼ガスタービンや IGHAT（Integrated coal Gasification Humid Air Turbine：石炭ガス化湿分空気利用ガスタービン）へ応用することも検討されており、高い波及効果を有している。現在までに、国内外から高い評価を得ている国産の技術であり、事業化も期待されているので、現在までの開発速度を落とすことなく開発・研究が進展することを期待する。

なお、バイオマス起源のガス燃料への適用技術など、ガスタービンの燃料多様化技術は重要である。バイオガスは一般的に発熱量が低いため、ことに高湿分空気中での燃焼特性は LNG とは大きく異なることが予想されることから、基礎的燃焼特性の把握など、大学などとの共同研究が望まれる。

また、発電規模に対する開発コストを勘案すると、相当の費用圧縮が必要と思われる。

更に、本技術については日本オリジナルな技術であるところから、標準化、規格化に取り組むことにより世界をリードしていく意味でプロジェクトの国際化をするべきで、その結果として国際標準化を目指すべきである。

【肯定的意見】

・目標は達成されている。
・小型で起動停止性能が良く、内陸で使える技術は再生可能エネルギー導入が増える中で国際的に求められている。
・本技術実証事業が開始して2年目の成果としては、特許・論文の提出状況や、各個別の技術開発目標に対する達成度はおおむね満足できるものと考える。
・現在までに0.3万kW級実証試験及び4万kW級試験装置を用いてデータの取得と実証試験を行ってきた経緯があり、最終的な目標である10万kW級の中小容量機の高効率化実証に向けて準備は整っていると考える。ただし、実用化に向けて必要となる技術課題は依然として多く残されており、それを平成27年度までの期間に集中して行い、その後、実証試験に移るという計画もおおむね妥当であると考える。

本事業の実用化段階では、既設の同容量機と比して10%程度も高い効率の実現が期待できるため、我が国における需要は高く、費用対効果も極めて高いと考える。
また、本事業は将来的に水素燃焼ガスタービンやIGHATへ応用することも検討されており高い波及効果を有している。現在までに、国内外から高い評価を得ている国産の技術であり、事業化も期待されているので、現在までの開発速度を落とすことなく開発・研究が進展することを期待する。

・設定された技術開発の実施項目が全て達成されており、順調に実証事業が進捗していると評価できる。
・中容量機の効率化・運用改善の観点から、高湿分空気利用ガスタービンシステム等の新しいシステムの開発は有効である。
・世界的にはマイクログリッド用小型10万ｋW程度のガスタービン発電機が数多く必要になるだろう。水と電気の併給が熱効率を上げるからである。その点でこのプロジェクトは重要で時宜に合っている。日本のオリジナル技術であるところが良い。実証には広い検討が必要だが効果的結果となっている。

【問題点・改善すべき点】

・引き続き事業の積極的な推進を期待するが、評価時期が尚早。
・バイオマス起源のガス燃料への適用技術など、ガスタービンの燃料多様化技術は重要である。バイオガスは一般的に発熱量が低いため、ことに高湿分空気中での燃焼特性はLNGとは大きく異なることが予想されることから、基礎的燃焼特性の把握など、大学などとの共同研究が望まれる。
・現在までの実証試験により、多くのデータの蓄積と経験を有しているので、現時点で明確な技術的問題点や改善すべき点は見当たらない。問題は、4 万 kW 級試験装置の実証データを基に、10 万 kW 級商用機の開発を行う点であるが、実証及び様々なトラブル解決に十分な時間が確保できるかが疑問である。
・成果、目標の達成度について、全て「達成」と説明されているが、達成に至るまでの過程で問題や課題が生じていた場合は、その内容や対処状況なども報告すべき。
・発電規模に対する開発コストを勘案すると、相当の費用圧縮が必要と思われる。
・日本オリジナルな技術であるところから、世界から孤立する恐れがある。世界をリードする意味でプロジェクトの国際化をするべきで、その結果として国際標準化を目指すべきである。

Ｃ．先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発事業

（総合評価）

A-USC（Advanced Ultra Super Critical：先進超々臨界圧）発電技術は、我が国の昨今のエネルギー事情を考えると不可欠の技術であり、着実に計画に則った成果を挙げていると判断する。蒸気温度を700℃以上に上昇させることで高温となるボイラ、タービン、高温弁の材料開発を中心とした試験時間の長い開発・研究を継続的に行っており、現在までに得られたデータは貴重である。特に3～7万時間にも及ぶ材料の長期高温試験からは、貴重な成果と知見が得られることと考える。これらの基礎データから10万時間の材料特性を外挿によって推定する過程の不確かさが懸念であったが、試験データを見る限り、現在までは妥当な結果が得られていると評価できる。

本事業の波及効果としては、ガスタービンコンバインドサイクルへの導入による高効率化が挙げられ、十分に大きいと判断できる。

以上より現時点での中間評価としては十分な成果であり、これを基にした今後の実証機検証を期待したい。

なお、現在のUSC火力で用いられている高クロム鋼の溶接部で発生している損傷事例も踏まえ、ニッケル基材の経年化に伴うクリープ強度評価や寿命診断技術などにも取り組んでもらいたい。

また、 蒸気温度の上昇に伴う高温対策と評価を、ボイラ、タービン、高温弁を中心に行っているが、実証に向けて他の部材への影響評価を十分に行うとともに、材料評価にとどまらず、例えばタービンの性能や効率，信頼性や運用性に関する評価や検証を期待したい。

更に、経済性に優れるとともに長期信頼性を有した材料の開発が必要となる。検証を確実に実施しながら材料開発を行うべきである。

【肯定的意見】

・目標は達成されている。
・石炭の有効利用に資するものである。
・長期試験をしっかり行っている。
・東日本大震災前の2010年度に我が国の年間発電電力量の25%を賄っていた石炭火力は、震災後原子力発電所がほとんど停止した2012年度にも約28%を占めており、我が国のエネルギーミックスの上からも将来的に重要な電源である。
・本プロジェクトは世界最高の技術レベルにある我が国の微粉炭火力の蒸気条件を従来の600℃級から700℃級にまで高め、熱効率を飛躍的に向上させることを目指したものであり地球環境問題への対応の上からも極めて有用である。
・主要要素技術開発のこれまでの成果は、目標をおおむね満足するものであり、今後の実証機による検証が期待される。

・　A-USC発電技術は，我が国の昨今のエネルギー事情を考えると不可欠の技術であり、着実に計画に則った成果を挙げていると判断する。蒸気温度を700℃以上に上昇させることで高温となるボイラ、タービン、高温弁の材料開発を中心とした試験時間の長い開発・研究を継続的に行っており、現在までに得られたデータは貴重である。特に3～7万時間にも及ぶ材料の長期高温試験からは、貴重な成果と知見が得られることと考える。これらの基礎データから10万時間の材料特性を外挿によって推定する過程の不確かさが懸念であったが、試験データを見る限り、現在までは妥当な結果が得られていると評価できる。

本事業の波及効果としては、ガスタービンコンバインドサイクルへの導入による高効率化が挙げられ、十分に大きいと判断できる。

以上より現時点での中間評価としては十分な成果であり、これを基にした今後の実証機検証を期待したい。

・　我が国が世界をリードしている高効率石炭火力発電のさらなる効率化を達成するために重要な技術分野であり、当要素技術の開発が順調に進めば、我が国の優位性を維持・向上することができると考えられることから、国の事業として妥当性・有効性が高いと考えられる。

各要素技術において、現時点までに設定された目的は何れも達成されており、当事業の成果は着実に得られていると評価できる。

・A-USC 発電は、石炭火力の効率向上及びＣＯ2 排出量低減に有効な技術であり、着実な開発をお願いしたい。

・世界的に石炭はまだまだエネルギーの主流である。そこで日本は先進国であるが更に先駆けて高効率化のプロジェクトを推進している。原子力発電が止まっている中でこのような成果が上がっていることが頼もしい限りである。

【問題点・改善すべき点】

・多数の実施者が参加しているが、事業化に向けた体制の構築を検討することも将来的には必要。

・現在のUSC火力で用いられている高クロム鋼の溶接部で発生している損傷事例も踏まえ、ニッケル基材の経年化に伴うクリープ強度評価や、寿命診断技術などにも取り組むべき。

・　蒸気温度の上昇に伴う高温対策と評価を、ボイラ、タービン、高温弁を中心に行っているが、実証に向けて他の部材への影響評価を十分に行うべき。また、材料評価にとどまらず、例えばタービンの性能や効率、信頼性や運用性に関する評価や検証を期待したい。

蒸気温度750℃で送電端熱効率48%という最終目標は非常に高い目標設定であり、現時点の成果・データからこの最終目標が達成可能であるという判断をすることは難しい。

・成果、目標の達成度について、全て「達成」と説明されているが、ボイラ、タービンは

商業運転時に異常停止につながるトラブルが発生しやすい部位だけに、成果達成に至るまでの過程で問題や課題が生じていた場合は、その内容や対処状況などについてできるだけ詳細に報告すべき。

・経済性に優れるとともに長期信頼性を有した材料の開発が必要となる。検証を確実に実施しながら材料開発を行うべきである。

・上記に示す以外にも、現在のUSCの課題について明確にしたうえで、その課題に対して、どのような技術進歩・改良を行っているか示していく必要があると考える。

Ｄ．次世代型双方向通信出力制御実証事業

（総合評価）

5つの要素技術に対して明確な目標を定め、計画に従って着実に成果を挙げており、現在までの経緯は高く評価できる。特に、住宅用、事業用PCS(Power Conditioning System：直流交流変換装置)に関しては実環境下に設置したフィールド試験を実施中であり、良好な成果が得られている。また、蓄電池用PCSや電圧調整機能付きPCSの開発に関しても、それぞれ接続試験や工場試験を実施済みであり、実フィールド試験を残すのみとなっている。PCS出力の制御を行うための種々の双方向通信機器の開発も各種行われており、試験データが蓄積されている。更に、サイバーセキュリティ関連機器の開発に関しては、検知システムのフィールド試験を既に実施している。このように5つの要素技術各々に関しての進捗状況はおおむね良好であると評価する。

この技術は、明確な目標と実施計画に基づき、企業、大学及び電力会社が有機的に協力して展開されており、その研究・開発体制も適切であり、今後の発展が期待できる。

更に、本実証事業に留まらず太陽光発電の大量導入に関連する「次世代送配電系統最適制御技術実証」並びに「太陽光発電出力予測技術開発実証」とも密に連携が図られている点も評価できる。

なお、本事業で得られた成果（開発された技術）を社会に適用していくためには、政策が中心となって例えば採用すべき通信方式の決定などを行っていく必要があり、政策当局による、本事業の成果の活用を期待する。また、実際に事業化するか否かについては、国の政策面での後押しが必要。更に、このようなシステムではサイバーセキュリティが重要なので、サーバーを守るだけではなく、システム全体のセキュリティを考えるべき。

【肯定的意見】

・当初予定されていた項目に加え、無効電力による配電線電圧制御といった新しい項目も実施され、大きな成果を挙げている。また他の事業との連携が図られている。
・5つの要素技術に対して明確な目標を定め、計画に従って着実に成果を挙げており、現在までの経緯は高く評価できる。特に、住宅用、事業用PCSに関しては実環境下に設置したフィールド試験を実施中であり、良好な成果が得られている。また、蓄電池用PCSや電圧調整機能付きPCSの開発に関しても、それぞれ接続試験や工場試験を実施済みであり、実フィールド試験を残すのみとなっている。PCS出力の制御を行うための種々の双方向通信機器の開発も各種行われており、試験データが蓄積されている。更に、サイバーセキュリティ関連機器の開発に関しては、検知システムのフィールド試験を既に実施している。このように5つの要素技術各々に関しての進捗状況は概ね良好であると評価する。
この技術は、明確な目標と実施計画に基づき、企業、大学及び電力会社が有機的に協力して展開されており、その研究・開発体制も適切であり、今後の発展が期待できる。

・系統への負荷を軽減しつつ、太陽光発電の大量導入を図るために有効な技術開発分野であり、国策として太陽光発電の導入を推進している状況を勘案すると、国が関与して取り組むべき技術開発分野であると考えられる。設定された目的はいずれも達成されており、実証事業の成果は得られたと評価できる。
・参加法人が33法人と極めて多いプロジェクトであるが、実施項目毎にSWG（Sub Working Group：サブワーキンググループ）を組織し責任体制を明確にするとともに、適宜SWG間の連携も取り実行されている。
・更に、本実証事業に留まらず太陽光発電の大量導入に関連する「次世代送配電系統最適制御技術実証」並びに「太陽光発電出力予測技術開発実証」とも密に連携が図られている点も評価できる。
・成果の発表は海外も含め積極的に実施されている。
・多くの参加者を得たことは評価できる。今、可能性のある可能な研究を広く集めた。

【問題点・改善すべき点】
・　本事業で得られた成果（開発された技術）を社会に適用していくためには、政策が中心となって例えば採用すべき通信方式の決定などを行っていく必要があり、政策当局による、本事業の成果の活用を期待。
　大きな成果を挙げてているので、研究成果の積極的な発表（学会発表や論文投稿）を期待。
・このようなシステムではサイバーセキュリティが重要なので、サーバーを守るだけではなく、システム全体のセキュリティを考えるべき。
・蓄電池用PCSや電圧調整機能付きPCSの開発の進捗状況は適切であるか。予定されている実施期間内に実フィールド試験が終了し、動作の安定性や出力制御の評価まで達成できるのか疑問。
・当事業の開始時点と比べて、電源構成や太陽光発電の家庭用・事業用の導入状況などの前提条件が一部変化していると考えられるが、その変化が実証事業に十分に反映されていない面があるように思われる。
・実証事業としての問題点等は特になし。なお、実証事業で事業化への十分な技術成果は得られているが、実際に事業化するか否かについては、国の政策面での後押しが必要。
・参加者が多すぎる。情報を共有して、何かを生み出すようなことは無かったのではないか。寄せ集めで、どの方法でも長短があるのだが、その問題点の洗い出しが必要ではないか。もっと絞って行うべきであった。それぞれ個々には新規性がない。

Ｅ．太陽光発電出力予測技術開発実証事業

（総合評価）

将来的な再生可能エネルギーの有効利用に備えて、太陽光発電に不可欠な出力予測技術の開発は重要であり、本技術の必要性や有効性は高く評価できる。また、大学や企業に加えて電力10社が参加する実施体制も十分であると考える。 太陽光発電の出力の予想精度が向上すると、太陽光発電の供給力への算入がより正確にできるようになり、系統容量に対する太陽光発電の導入可能量の拡大、系統全体の効率化などの成果が期待できることから、国策として推進されている再生可能エネルギーの導入拡大策の一環として、国が取り組むべき技術開発分野と考えられる。 なお、本技術の最終目標である発電出力の予測は、日射量などの気象データから推定されるもので、長期間にわたる高精度な観察が不可欠であり、3 年間という短時間に信頼できる日射量データベースの構築が可能であるのかが疑問である。今後 3 年間の継続調査に期待したい。また、気象モデルから日射量を推定する技術に関しても、特に新規性は認められない。実施者間の連携が有効に機能しているのか疑問が残る。 当該研究は先行研究が多数存在することが考えられ、それらの成果がどのように利用されているのか、あるいはこれからどのように利用しようしているのかも不明である。基礎研究が多く、事業化に向けての道のりはまだ相当長いと考えられる。

【肯定的意見】

・本事業は予定された課題に対する目標を十分に達成している。
・今後非常に重要な技術である。
・将来的な再生可能エネルギーの有効利用に備えて、太陽光発電に不可欠な出力予測技術の開発は重要であり、本技術の必要性や有効性は高く評価できる。また、大学や企業に加えて電力10社が参加する実施体制も十分であると考える。
・　太陽光発電の出力の予想精度が向上すると、太陽光発電の供給力への算入がより正確にできるようになり、系統容量に対する太陽光発電の導入可能量の拡大、系統全体の効率化などの成果が期待できることから、国策として推進されている再生可能エネルギーの導入拡大策の一環として、国が取り組むべき技術開発分野と考えられる。
　設定された目的はいずれも達成されており、実証事業の成果は得られたと評価できる。
・本実証事業に留まらず太陽光発電の大量導入に関連する「次世代送配電系統最適制御技術実証」並びに「次世代双方向通信出力制御実証事業」と密に連携が図られている点は評価できる。
・成果について、論文数も多く、また発表は海外も含めて積極的に実施されている。
・また、本実証で評価・検証に用いたデータの期間が短く、年度による天候のバラツキの影響が懸念されるが、これについて、今後、フォローアップとして、さらなる複数年の

データで評価されることがしっかりと予定されている。
・予測精度の目標は５％程度の誤差は許されると思うので，既に目的は達せられていると思う。

【問題点・改善すべき点】
・数多くの企業等が参画し、分担して課題を実施しているが、将来に向けて、各実施者の知見やデータをどのように共有していくのかが明らかにされていない。得られた知見・成果が、各実施者に埋もれてしまい、共有財産として十分活用されない懸念がある。得られたデータをデータベース化し、自由にアクセスできる仕組みを整備することも検討すべき。
・自然エネルギー発電の発電予測は、これまでも数十年にわたる歴史があり、本事業の事業期間は数年間しかなく、不十分であると考える。将来も引き続き事業を継続できるよう長期的な予算措置を検討すべき。
・予測については精度が十分でなく、実用化に問題がある可能性がある。
・日射量や太陽光発電出力予測に関する様々な手法の推定誤差などを明らかにしているが実運用上必要（目標）とされる精度を踏まえた各種手法の評価を行えば、現状の技術の達成度や課題などがより明確に伝わる。
・本技術の最終目標である発電出力の予測は、日射量などの気象データから推定されるもので、長期間にわたる高精度な観察が不可欠であり、3年間という短時間に信頼できる日射量データベースの構築が可能であるのかがまず疑問である。今後3年間の継続調査に期待したい。また、気象モデルから日射量を推定する技術に関しても、特に新規性は認められない。実施者間の連携が有効に機能しているのか疑問が残る。当該研究は先行研究が多数存在することが考えられ、それらの成果がどのように利用されているのか、あるいはこれからどのように利用しようしているのかも不明である。基礎研究が多く、事業化に向けての道のりはまだ相当長いと考えられる。
・太陽光発電は、太陽光発電パネルの種類・性能・構成、ＰＣＳの性能、家庭用・事業用の構成やパネルの分布・設置状況などによって変化するが、本実証事業の期間以降に太陽光パネルの大量導入が進んだこと、経年的な評価が十分に報告されていないことなどから、実証試験によって得られた出力の予測・推定手法が現在及び将来においても正確に適用できるか判断しづらい。

第６章　今後の研究開発の方向等に関する提言

第６章　今後の研究開発の方向等に関する提言

【技術に関する施策】

（次世代電力供給システム分野）

今後も地球温暖化対策に資する技術（再生可能エネルギーの導入促進、効率改善）を推進すべき。

火力発電技術開発と送配電技術開発については、施策の目的と位置付けは明確に示されており、今後も継続的な研究・開発を行っていく必要がある。特に火力発電技術は、1700℃級ガスタービンの開発やAHAT（Advanced Humid Air Turbine：高湿分空気利用ガスタービン）が、例えば石炭ガス化技術IGCCの事業化を推し進める役割を果たすように、様々な個別技術を統合・連携する施策が必要である。このためにも国が積極的に関与・支援して、エネルギー対策を推し進めるべきであり、それにより、各企業や大学の研究レベルも向上し、ひいては我が国の技術レベルの底上げが期待できる。

また、優位性のある国産技術の海外展開に資する最先端の技術開発分野に優先的に取り組むべき。例えば、本年度の主な対象事業にもなっている高効率発電は、我が国の企業群が、素材の開発・製造・加工、部品・部材の設計・製造、プラントの設計・施工・運営、メンテナンス、改良などを一貫体制で実施でき、また、国内での新増設やリプレース需要だけでなく、市場規模が極めて大きい海外での事業展開も期待できるだけに、今後も、国が主導して技術開発を推進すべき。

更に、日本のビームやレーザを使った最新の評価技術を駆使して、材料開発の成果を確かめることができる。評価することが出来れば、そこに進歩する方法が見つかる。基礎的開発はこの評価が大きなコストになるが必要となる。

機械工学、電気工学、情報工学などの大きな進歩が総合的に組み合わされて大きな進歩になる。

その分野の専門家ばかりではなく、異分野との交流が思わぬ発展のもとになる。

【各委員の提言】

・我が国の電力基盤の将来像が不明確であり、早期に明確化を図る必要がある。原子力を含めた電源構成、電気及びガス事業の体制、送配電系統の将来像、などが明確にならないと長期的な視点からの技術開発が実施できなくなることを懸念。
・今後も地球温暖化対策に資する技術（再生可能エネルギーの導入促進、効率改善）を推進すべき。
・太陽光発電以上に需要と発電出力とのミスマッチが生じやすい風力発電の大量導入に関わる技術開発事業（出力予測、系統負荷制御、単独系統への負荷を軽減する送電システムなど）の実施を検討すべき。

・シェール革命による、世界及び日本のエネルギー情勢への影響に関する分析、評価の反映。
・火力発電技術開発と送配電技術開発については、施策の目的と位置付けは明確に示されており、今後も継続的な研究・開発を行っていく必要がある。特に火力発電技術は、1700℃級ガスタービンの開発やAHATが、例えば石炭ガス化技術IGCCの事業化を推し進める役割を果たすように、様々な個別技術を統合・連携する施策が必要である。このためにも国が積極的に関与・支援して、エネルギー対策を推し進めていただきたいし、それにより、各企業や大学の研究レベルも向上し、ひいては我が国の技術レベルの底上げが期待できる。
・BP統計2013によれば、世界の石炭の確認可採埋蔵量（約8,609億トン）の内訳として、「無煙炭＋瀝青炭」が47.0%、「亜瀝青炭＋褐炭」が53%を占めている。わが国が使用する発電用石炭を将来的にも安定的に確保するには、現在はほとんど利用していない、発熱量が低く、水分含有量が多い亜瀝青炭や褐炭などの“低品位炭”の利用拡大が不可欠である。技術的課題としては、水分の多い低品位炭のボイラでの安定燃焼技術や、ミルにおける最適粉砕技術、自然発火性の高い低品位炭の輸送・貯炭技術などが挙げられる。
・再生可能エネルギー発電の急速な大量導入が進む欧州では、出力変動の大きい再生可能エネ発電のバックアップの役割を担う火力発電プラントのFlexibility（運用柔軟性）の一層の向上が求められている。このような欧州の電力事情から見えてくる、我が国火力の将来的な技術課題としては、火力発電プラントの ①起動・停止時間の短縮　②負荷変化速度の向上　③最低負荷の一層の低減などが考えられるが、プラントのFlexibility向上を図るには、その他にプラント全体に関わる課題が存在する。例えば、負荷変化速度の向上には、ミルなど給炭系の制御技術や蒸気タービンサイドの蒸気系制御技術に関わる課題などがある。
・優位性のある国産技術の海外展開に資する最先端の技術開発分野に優先的に取り組むべき。例えば、本年度の主な対象事業にもなっている高効率発電は、我が国の企業群が、素材の開発・製造・加工、部品・部材の設計・製造、プラントの設計・施工・運営、メンテナンス、改良などを一貫体制で実施でき、また、国内での新増設やリプレース需要だけでなく、市場規模が極めて大きい海外での事業展開も期待できるだけに、今後も、国が主導して技術開発を推進すべき。
・　日本のビームやレーザを使った最新の評価技術を駆使して，材料開発の成果を確かめることができる。評価することが出来れば，そこに進歩する方法が見つかる。基礎的開発はこの評価が大きなコストになるが必要である。

　機械工学、電気工学、情報工学などの大きな進歩が総合的に組み合わされて大きな進歩になる。

　その分野の専門家ばかりではなく、異分野との交流が思わぬ発展のもとになる。例えば、化学工学が加われば、電気は貯蔵しにくいので水素やアンモニアとかの化学物質に

かえて貯蔵と輸送するのが良い。

・次世代型双方向通信出力制御実証事業に関連して、電力関連の製造メーカー側の開発ニーズではなく、もっとユーザー（例えば工場の電力管理者）の意見，評価を入れるべきである。エネルギー消費は主に熱と電気であるから，マイクログリッドも各家庭で発電して排熱も利用すれば総合効率は更に良くなる。

【技術に関する事業】（※提言があった事業について記載。）

（B1　1700℃級ガスタービン技術実証事業）

タービンなどの寿命がメンテナンスコストを決めるので効率ばかり追わないで総合的に捉える必要がある。オリジナルな技術が１つでも必要である。国際標準化戦略で差を付ける。そして、国際プロジェクト化して日本がリーダーとなることが重要。

【各委員の提言】

・タービンなどの寿命がメンテナンスコストを決めるので効率ばかり追わないで総合的に捉える必要がある。オリジナルな技術が１つでも必要である。国際標準化戦略で差を付ける。そして，国際プロジェクト化して日本がリーダーとなることが重要。

（Ｄ　次世代型双方向通信出力制御実証事業）

産官学の様々な実施者によるオープンイノベーションの促進、公的資金による研究の成果は公共財であるとの認識による成果・データに対するオープンアクセスの提供などの実現を期待する。

【各委員の提言】

・産官学の様々な実施者によるオープンイノベーションの促進、公的資金による研究の成果は公共財であるとの認識による成果・データに対するオープンアクセスの提供などの実現を期待する。

（Ｅ　太陽光発電出力予測技術開発実証事業）

産官学の様々な実施者によるオープンイノベーションの促進、公的資金による研究の成果は公共財であるとの認識による成果・データに対するオープンアクセスの提供などの実現を期待する。

【各委員の提言】

・産官学の様々な実施者によるオープンイノベーションの促進、公的資金による研究の成果は公共財であるとの認識による成果・データに対するオープンアクセスの提供などの実現を期待する。

第７章　評点法による評点結果

第７章 評点法による評点結果

「次世代電力供給システム分野」に係る技術に関する施策・事業評価の実施に併せて、以下に基づき、本評価検討会委員による「評点法による評価」を実施した。その結果は「３．評点結果」のとおりである。

１．趣　旨

評点法による評価については、産業技術審議会評価部会の下で平成 11 年度に評価を行った研究開発事業（39 プロジェクト）について「試行」を行い、本格的導入の是非について評価部会において検討を行ってきたところである。その結果、第 9 回評価部会（平成 12 年 5 月 12 日開催）において、評価手法としての評点法について、

(1)数値での提示は評価結果の全体的傾向の把握に有効である、

(2)個々のプロジェクト毎に評価者は異なっても相対評価はある程度可能である、

との判断がなされ、これを受けて今後のプロジェクト評価において評点法による評価を行っていくことが確認されている。

また、平成 21 年 3 月 31 日に改定された「経済産業省技術評価指針」においても、プロジェクト評価の実施に当たって、評点法の活用による評価の定量化を行うことが規定されている。

これらを踏まえ、プロジェクトの中間・事後評価においては、

(1)評価結果をできる限りわかりやすく提示すること、

(2)プロジェクト間の相対評価がある程度可能となるようにすること、

を目的として、評価委員全員による評点法による評価を実施することとする。

本評点法は、各評価委員の概括的な判断に基づき点数による評価を行うもので、評価報告書を取りまとめる際の議論の参考に供するとともに、それ自体評価報告書を補足する資料とする。また、評点法は研究開発制度評価にも活用する。

２．評価方法

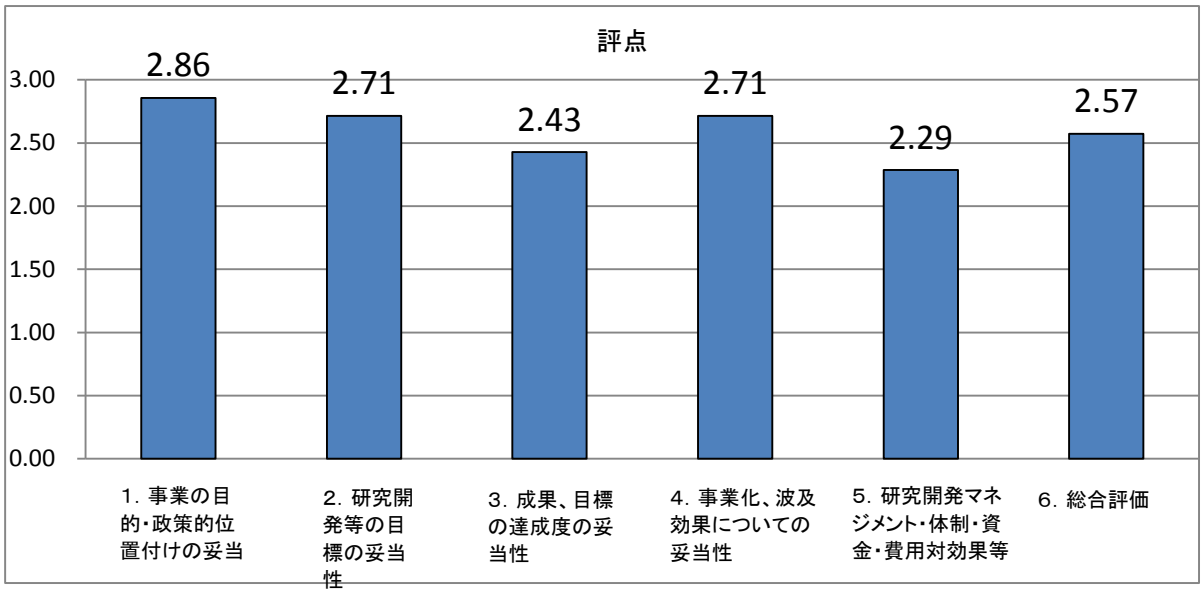
・各項目ごとに４段階（Ａ(優)、Ｂ(良)、Ｃ(可)、Ｄ(不可)〈ａ，ｂ，ｃ，ｄも同様〉）で評価する。
・４段階はそれぞれ、Ａ（ａ）＝３点、Ｂ（ｂ）＝２点、Ｃ（ｃ）＝１点、Ｄ（ｄ）＝０点に該当する。
・評価シートの記入に際しては、評価シートの《判定基準》に示された基準を参照し、該当と思われる段階に〇を付ける。
・大項目（Ａ，Ｂ，Ｃ，Ｄ）及び小項目（ａ，ｂ，ｃ，ｄ）は、それぞれ別に評点を付ける。
・総合評価は、各項目の評点とは別に、プロジェクト全体に総合点を付ける。

３．評点結果

評点法による評点結果

（A1 1700℃級ガスタービン実用化技術開発事業）

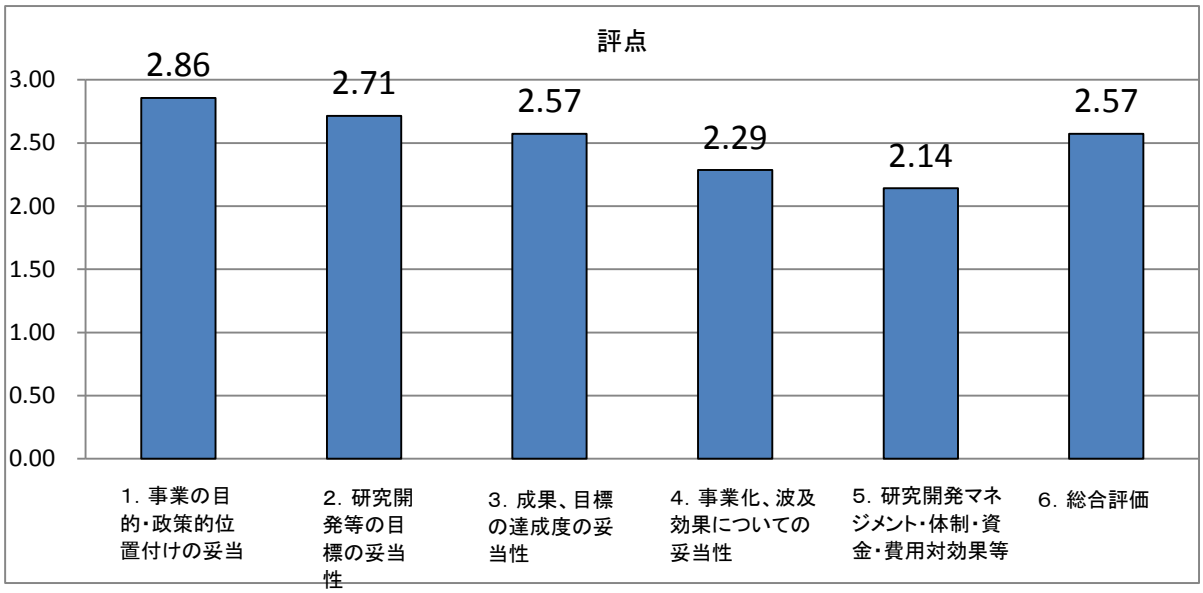
	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.86	3	2	3	3	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.71	2	3	3	3	3	3	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.43	2	2	3	3	3	2	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.71	3	3	3	3	3	2	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.29	2	2	3	3	2	2	2
6. 総合評価	2.57	3	2	3	3	3	2	2



評点法による評点結果

（A2 高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発事業）

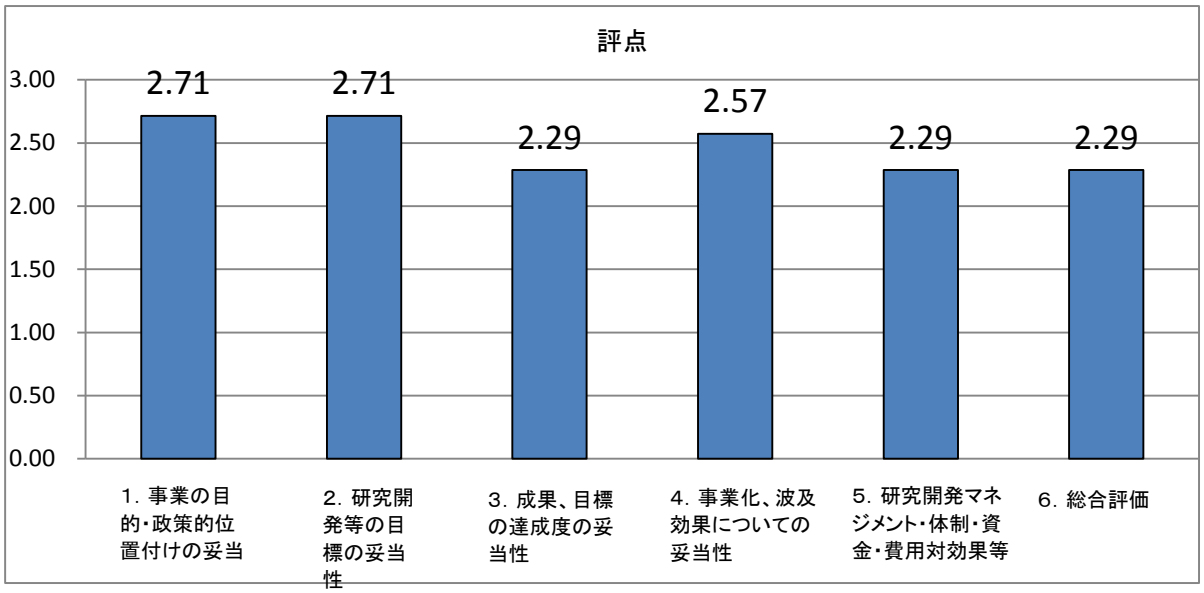
	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.86	3	3	3	3	3	2	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.71	2	3	3	3	3	2	3
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.57	2	2	3	3	3	2	3
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.29	3	2	3	3	2	1	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.14	2	2	3	3	2	1	2
6. 総合評価	2.57	3	2	3	3	3	2	2



評点法による評点結果

（B1 1700℃級ガスタービン技術実証事業）

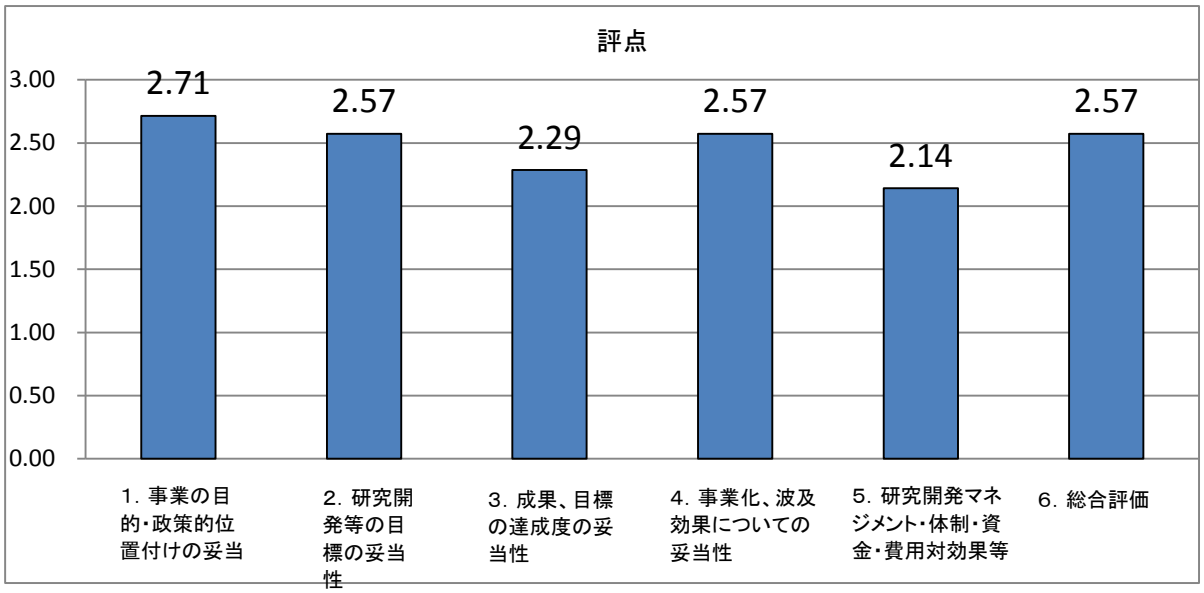
	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.71	2	2	3	3	3	3	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.71	2	3	3	3	3	3	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.29	2	2	3	3	2	2	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.57	3	3	3	3	2	2	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ･体制･資金･費用対効果等の妥当性	2.29	2	2	3	3	2	2	2
6. 総合評価	2.29	2	2	3	3	2	2	2



評点法による評点結果

（B2 高湿分空気利用ガスタービン技術実証事業）

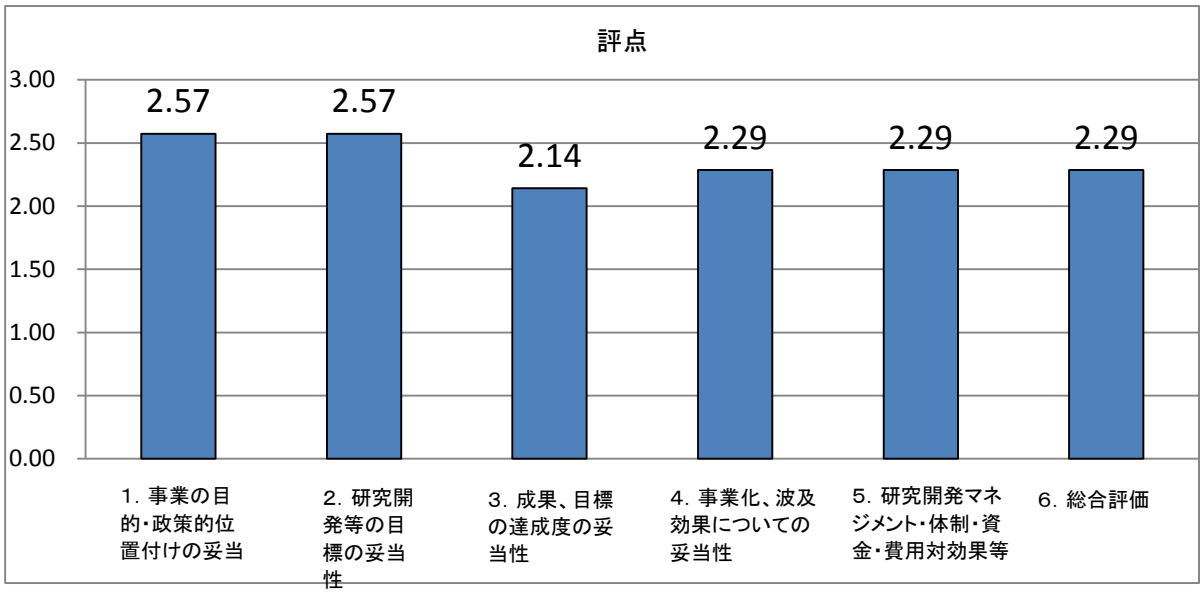
	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.71	2	3	3	3	3	2	3
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.57	2	3	3	3	3	2	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.29	2	2	3	3	2	2	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.57	3	3	3	3	2	1	3
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.14	2	2	3	3	2	1	2
6. 総合評価	2.57	2	3	3	3	2	2	3



評点法による評点結果

（C 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発事業）

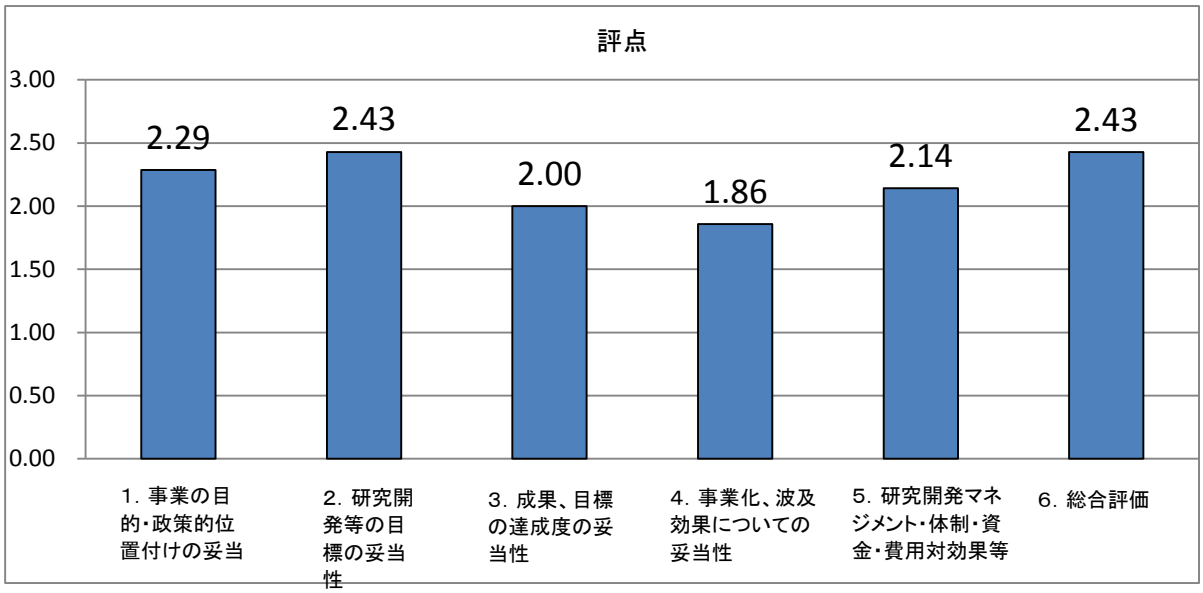
	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.57	2	2	3	3	3	3	2
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.57	2	2	3	3	3	3	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.14	2	2	3	2	2	2	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	2.29	2	2	3	3	2	2	2
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.29	2	2	3	3	2	2	2
6. 総合評価	2.29	2	2	3	3	2	2	2



評点法による評点結果

（D 次世代型双方向通信出力制御実証事業）

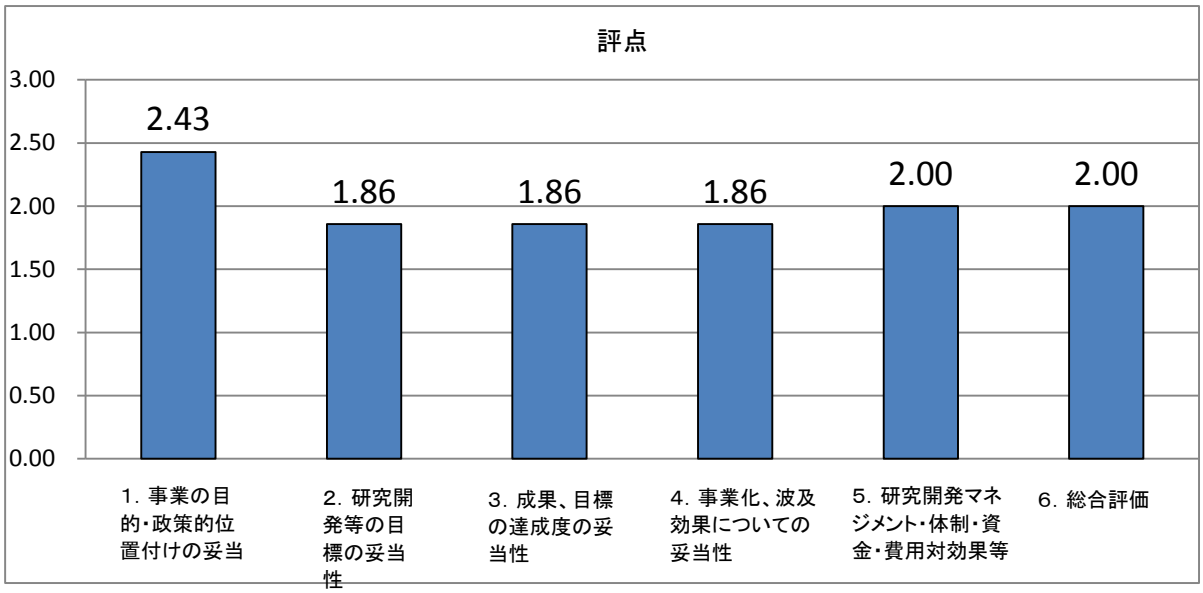
	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.29	3	2	2	3	2	3	1
2. 研究開発等の目標の妥当性	2.43	3	1	3	3	2	3	2
3. 成果、目標の達成度の妥当性	2.00	3	1	3	2	2	2	1
4. 事業化、波及効果についての妥当性	1.86	2	2	2	3	1	2	1
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.14	2	1	3	3	2	3	1
6. 総合評価	2.43	3	2	3	3	2	3	1



評点法による評点結果

（E 太陽光発電出力予測技術開発実証事業）

	評点	A 委員	B 委員	C 委員	D 委員	E 委員	F 委員	G 委員
1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.43	3	2	3	2	2	3	2
2. 研究開発等の目標の妥当性	1.86	2	1	2	2	2	3	1
3. 成果、目標の達成度の妥当性	1.86	2	1	2	2	2	2	2
4. 事業化、波及効果についての妥当性	1.86	2	2	2	3	1	2	1
5. 研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.00	2	2	3	2	1	3	1
6. 総合評価	2.00	2	2	2	2	2	3	1



参考資料１　実施事業者提供資料

次世代電力供給システム分野に係る技術に関する施策の概要について

平成25年11月13日

資源エネルギー庁

電力・ガス事業部電力基盤整備課

目　次

1.1.　施策の目的・政策的位置付け

1.2.　施策の構造

1.3.　施策の目的実現見通し

1.1. 施策の目的・政策的位置付

目的

我が国の現状と課題

〇地球温暖化を巡る動向
- 東日本大震災以降、火力発電の焚き増しにより、温室効果ガスの排出が大幅に増加

〇電源構成
- 東日本大震災後、原子力発電所の長期停止により、火力発電比率は約9割まで上昇するとともに、エネルギーコストも上昇

〇太陽光発電等の再生可能エネルギーの導入推進
- 天候等により電力系統が不安定になり、我が国の電力の安定供給を阻害するおそれあり

施策

〇ｴﾈﾙｷﾞｰ需給構造上の課題解決に向け、温室効果ガスの抑制、電力の安定供給といった点を踏まえた技術開発を推進していくことが重要。

1.1. 施策の目的・政策的位置付け

政策的位置付け（石炭火力発電技術）

「日本再興戦略」（平成25年６月14日）

◇高効率火力発電を徹底活用し、エネルギーコストを低減させる。（中略）先進技術開発を加速し、世界最高水準の効率を有する火力発電を我が国で率先して導入するとともに、世界へ積極的に展開する。

〇火力発電の技術開発支援

- 先進超々臨界圧火力発電（A-USC）について2020年代の実用化を目指す（発電効率：現状39%程度→改善後46%）。
- LNG火力について、2020年頃までに1700度級ガスタービンの実用化を目指す（発電効率：現状52%程度→改善後57%）。

「環境エネルギー技術革新計画」（平成25年９月13日）

◇生産・供給分野

日本のみならず、全世界においてエネルギーの安定供給と経済成長を図りつつ、低炭素化を実現するため、高効率火力発電技術の更なる高度化と再生可能エネルギーの低コスト化を行い、世界的な普及を図る。

◆環境エネルギー技術革新計画

1. 高効率石炭火力発電

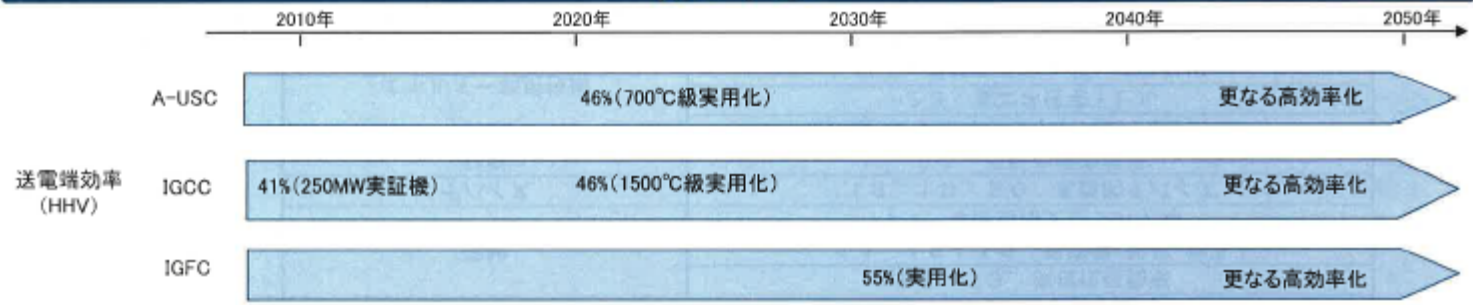
技術の概要

○高効率石炭火力発電技術としては、研究段階のものも含め、微粉炭石炭火力発電の蒸気条件が高温・高圧である超々臨界圧発電(USC)、先進的超々臨界圧発電(A-USC)や石炭をガス化して発電する石炭ガス化複合発電(IGCC)、IGCCに燃料電池を組み合わせた石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)といった技術がある。
○将来CCSが商用化し、導入されれば、二酸化炭素排出をほぼゼロにすることが可能。
○既に商用化されている日本の石炭火力発電技術(USC)を、米中印の海外の石炭火力発電に導入した場合、エネルギー起源CO_2を15億トン削減できるとの試算あり。

我が国の技術開発の動向・課題

○A-USCについては、技術開発支援を2008年度から実施中。電力産業用大容量ボイラー・タービンシステム、高温弁技術の開発が主要な課題。700℃以上の高温蒸気にも耐えられる材料の開発も課題。
○IGCCについては、空気吹きIGCCについて、福島県で実証試験を行い、今後は、ガスタービンの高効率化、燃焼器部分等の技術開発等が課題。
○IGFCについては、基幹技術である酸素吹IGCCについて、中国電力(株)の大崎発電所構内で、全体システムの信頼性向上等に係る実証試験を実施中。今後は、石炭ガス化ガスと燃料電池の適合性の検証等が課題。
○発電効率の向上、多炭種の活用、発電コストの低減に向けた技術開発が重要。

技術ロードマップ



○大学等における材料や触媒技術等の基礎研究と、民間主体のプラントをシステムとして実証する大型プロジェクトの連携を強化
○幅広い人材の育成による技術開発の推進

(※関連技術ロードマップ:30. 燃料電池)

国際動向

普及の現状

○世界の石炭火力発電所の大半は米国と中国、インドに集中しており、その多くは発電効率が35%以下と低い。USCは日本では既にかなり普及しており、中国でも最近大型石炭火力で導入が始まっている。インドでは一部SCの導入が行われているが、石炭火力発電所の多くは低効率の従来型である。

技術開発の動向

○欧州では電力・メーカーを主体としたAD700プロジェクトにおいて、現在700℃の蒸気を用いた各種要素試験が行われている。また、クリーン・コール政策として、(1)CCS(CO_2分離回収・貯留)、(2)IGCC(石炭ガス化複合発電)の推進に向けた資金支援プログラムを導入し、(3)超々臨界圧発電(USC)、先進的超々臨界圧発電(A-USC)についてはEU企業参加による共同開発を推進している。CCSについては2020年以降の商業実用化を目指しており、A-USCについては2016年までに実缶試験を完了する。
○米国では、「クリーン・コール・パワー・イニシアチブ」(CCPI)や、「クリーン・コール技術実証プログラム」の中で、将来的にゼロ・エミッションまたはそれに近い石炭火力の実現を目指している。

我が国の国際競争力

○我が国の石炭火力発電設備の平均発電効率は現時点で約41%(発電端・HHV)となっており、諸外国が30%台であるのと比較して世界最高の水準にある。

◆環境エネルギー技術革新計画

2. 高効率天然ガス発電

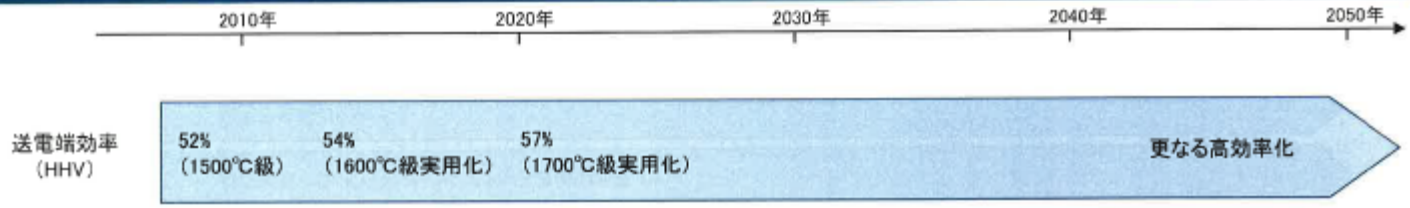
技術の概要

○高効率天然ガス発電技術としては、ガスタービン及び蒸気タービン複合発電技術や、開発中の高湿分空気利用ガスタービン技術（AHAT）がある。
○我が国では1600℃級のガスタービンの開発が完了し、2013年10月より関西電力の姫路第二発電所にて営業運転を開始予定（発電効率54%、送電端・HHV）。
○将来CCSが商用化し、導入されれば、二酸化炭素排出をほぼゼロにすることが可能。
○IEA はEnergy Technology Perspectives2010の(世界のエネルギー起源CO_2の排出量を2050年に2005年比で半減させる)ブルーシナリオにおいて、天然ガス火力発電で2.8億トン程度のポテンシャルがあると試算。

我が国の技術開発の動向・課題

○我が国は、コンバインドサイクル発電に関して、2013年頃に1600℃級で54%、2020年頃には1700℃級で57%の発電効率（送電端・HHV）を達成することを目指している。また、トリプルコンバインドサイクル発電システムについて、要素技術開発を実施している。
○AHATについては、2020年頃までに10万kW級で51%（送電端・HHV）の発電効率を実現することを目標としている。
○1700℃級ガスタービンの開発では、超高耐熱合金をはじめとする高温耐熱性タービンの開発等が主要な課題となっている。この課題を解決し、現状最大52%の発電効率（送電端・HHV）を57%（2020年頃）まで上げることが目標。
○AHATについては、高効率圧縮機設計技術やタービン翼冷却技術の開発が必要である。

技術ロードマップ



○ガスタービン技術は、空力、熱力、燃焼、材料等の広範囲で高度な設計技術・製造技術を有することから、産学官の連携の下、技術開発を進めることが重要（大学等における材料や触媒技術等の基礎研究と、民間主体のプラントをシステムとして実証する大型プロジェクトの連携を強化）
○幅広い人材の育成による技術開発の推進

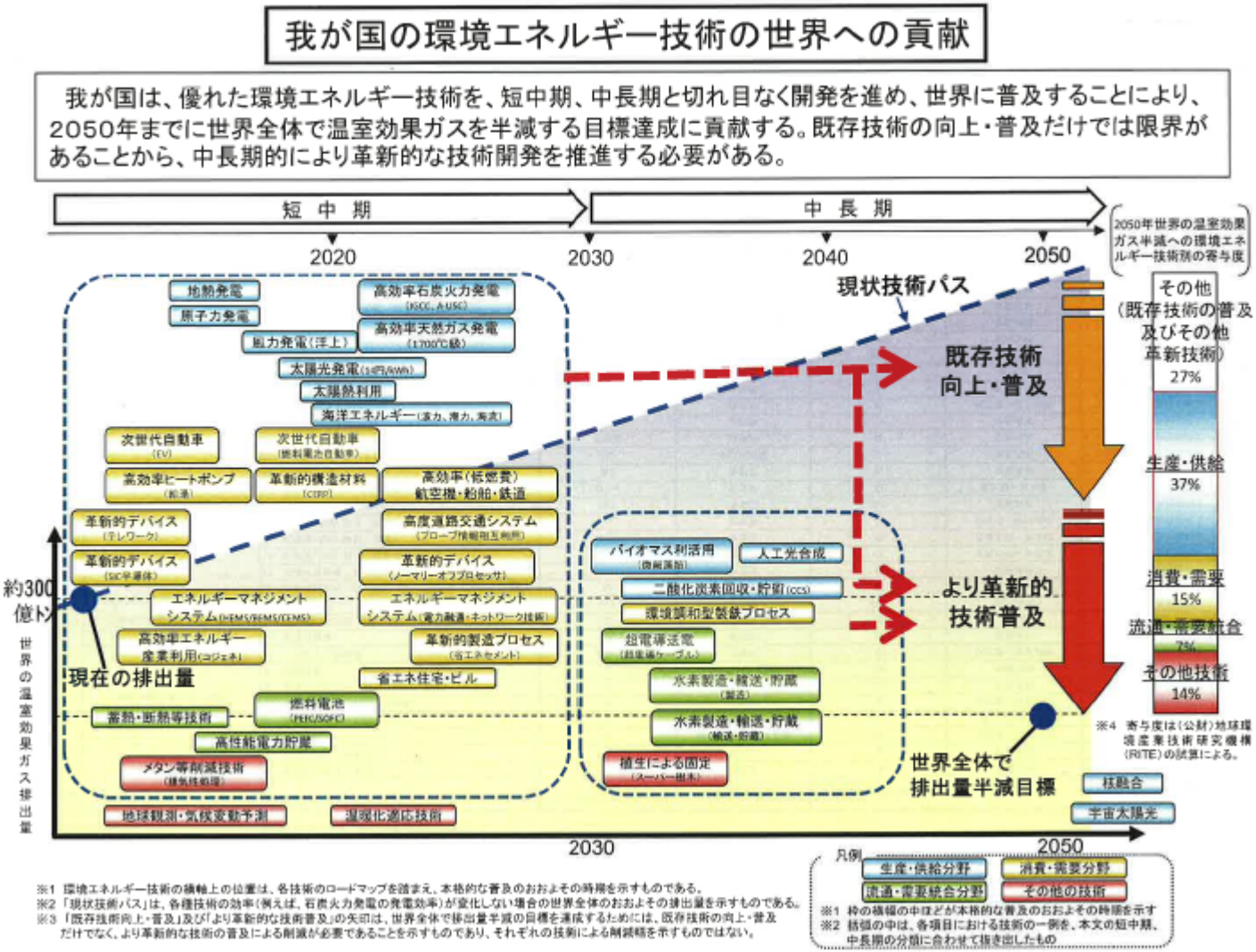
国際動向

普及の現状
○米国では、2013年にフロリダ州において、発電効率（送電端・HHV）が約54%となる高効率ガスタービンの営業運転が開始される予定。

技術開発の動向
○米国エネルギー省(DOE)の国家プロジェクトでは、ガスタービンメーカーや大学に2003年から2015年にかけて約1,000億円を投資して、高効率化を目指している。
○欧州では、CAME-GTと呼ばれるイニシアチブの中で高効率ガスタービンの開発が推進され、現在は第7次研究枠組計画（FP7）の中で個別の技術要素の改良に向けた研究開発が実施されている。

我が国の国際競争力
○我が国では、入口ガス温度を1600℃まで高め世界最高水準の発電効率（送電端・HHV）54%を実現した「1600℃級複合発電」が2013年10月頃に営業運転が開始される予定であり、我が国の技術開発レベルは世界最高水準にある。
○ガスタービンの高温化はスピードが非常に速く、1980年代初頭の複合発電システムの導入以降、年間約20℃という早いペースで燃焼温度の高温化が進み、熱効率が改善してきた。熾烈な開発競争の中、高温化に対して技術的に開発が可能な国は、米・独・日の３カ国に絞られつつある。

◆環境エネルギー技術革新計画



1. 1. 施策の目的・政策的位置付け

政策的位置付け（送配電技術）

「日本再興戦略」（平成25年６月14日）

◇次世代デバイス・部素材の開発を進め、生産から流通、消費の至るところに組み込んで製品・システムを高効率化することにより、エネルギーを効率的に利用する。

〇次世代デバイス・部素材（パワーエレクトロニクス等）研究開発・事業化

・ パワーエレクトロニクスや超低消費電力リバイス、光通信技術、超軽量・高強度の構造材料等の研究開発及び事業化を推進し、新市場を創出する。

「環境エネルギー技術革新計画」（平成25年９月13日）

◇流通・需給統合分野

従来のエネルギー需要家において、エネルギー変換や貯蔵が可能となる中、供給・流通・需要全体で最も効率的となるシステムの形成を目指し、必要な個々の技術を開発する。

◆環境エネルギー技術革新計画

33. 超電導送電

技術の概要

○超電導状態により、送電時のエネルギー損失を低減するケーブル送電技術（超電導は、特定の物質が低温に冷やされた時に、電気抵抗がゼロになる現象）

○高温超電導（超電導になる臨界温度が液体窒素の沸点（－196℃）より高い）線材を活用することにより、送電ロスを削減することが可能。

○今後の都市部における電力需要の増大や、途上国における一部電力系統の構築において、送電ロスを抑え電力エネルギーの効率的な利用を可能とする技術である。

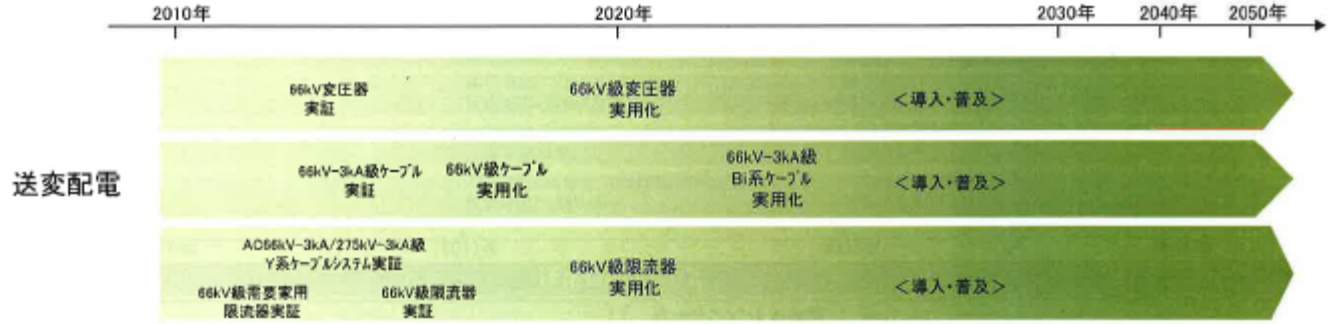
我が国の技術開発の動向・課題

○技術開発要素としては、線材・ケーブルの長尺化、高電圧化、大電流化、低損失化、変圧器や電力貯蔵装置の開発、冷凍機技術がある。

○NEDOにおいてY（イットリウム）系超電導電力機器の技術開発やBi（ビスマス）系高温超電導ケーブルの実証プロジェクトを実施。また、国土交通省においても、鉄道の変電所から電車に電力を供給する直流導き電線を超電導状態とする、超電導き電ケーブルの技術開発支援を実施。

○Y系超電導電力機器については、Y系材料を用いた300m以上の長さを有する線材や数10m級の超電導ケーブルを開発済み。Bi系高温超電導ケーブルについても、大容量化・低コスト化・長尺化を進めるための開発を進めており、早期の本格的な産業利用を目指している。

技術ロードマップ



国際動向

普及の現状

○先進国においては、送電ロスの低減のみならず大容量の送電が可能になることから、都市部の電力需要対策として地中ケーブルへの活用が期待されている。米国ニューヨーク州（オルバニープロジェクト）では2006年7月より約7万世帯に実線路に送電開始。

○我が国においては、昨年末よりNEDO事業の一環として電力系統への連系運転の実証を開始し、海外の電力各社等の注目を集めている。

技術開発の動向

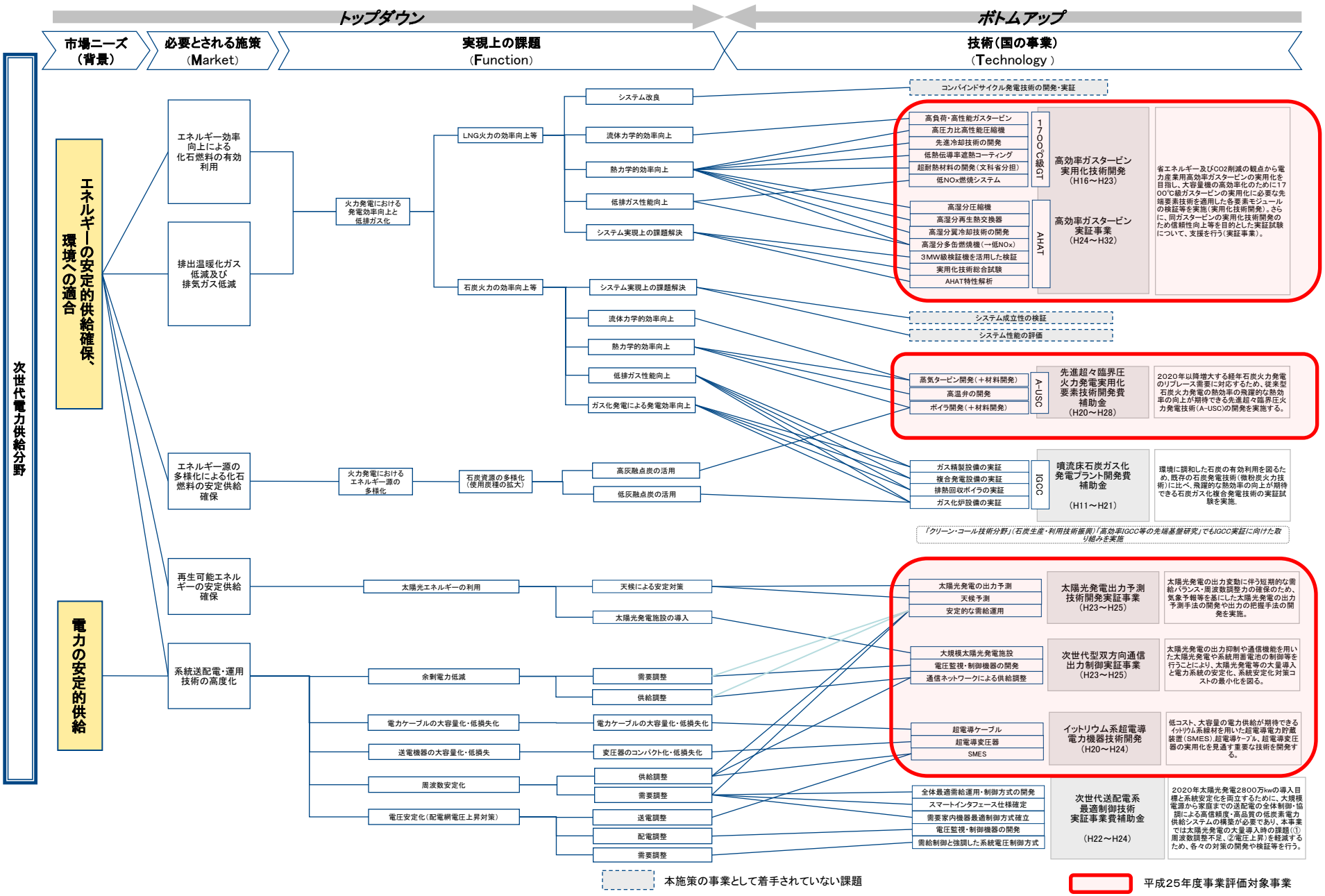
○NEDOでは、「イットリウム系超電導電力機器技術開発」や「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」を推進している。「イットリウム系超電導電力機器技術開発」では、Y系材料を用いた300m以上の長さを有する線材や超電導ケーブルの開発を実施。

○NIMSでは、新たな線材開発・超電導メカニズム解明から線材化プロセスなどを含め、送電時の低損失化等に資する先端超電導線材に関する研究を実施。

我が国の国際競争力

○超電導技術は我が国が優位性を有する分野であり、特に第1世代と呼ばれるビスマス系線材と、第2世代と呼ばれ世界的な競争が始まっているイットリウム系の超伝導ケーブルの開発では、日本が欧米に対して技術的リードを保っている。

1. 2. 施策の構造



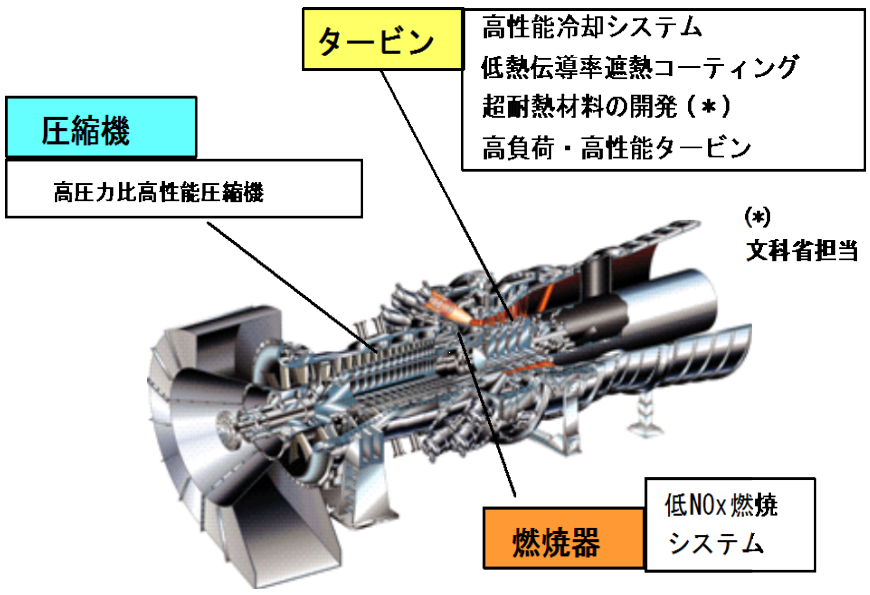
（出典）電力基盤整備課にて作成

1.3. 施策の目的実現の見通し

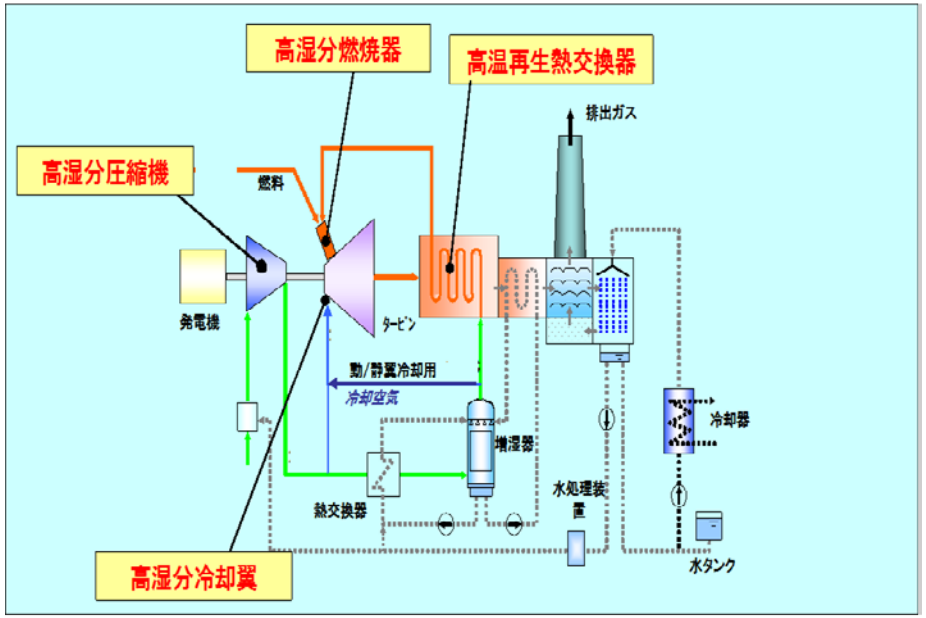
○高効率ガスタービン実用化技術開発・実証事業

プロジェクト概要	プロジェクトのアウトプット	カスタマー	プロジェクトのアウトカム
省エネルギーおよび二酸化炭素削減の観点から電力産業用高効率ガスタービンの実用化を目指す	従来型発電より高効率を達成できる実用化技術を確立	民間企業（電力会社、重工メーカーおよびエンジニアリング会社）	各発電形式による高効率発電システムを2020年頃に実用化を実現する。

○1700℃級ガスタービン（送電端効率57%（HHV））



○高湿分空気利用ガスタービン
（AHAT：Advanced Humid Air Turbine、送電端効率：51%（HHV））



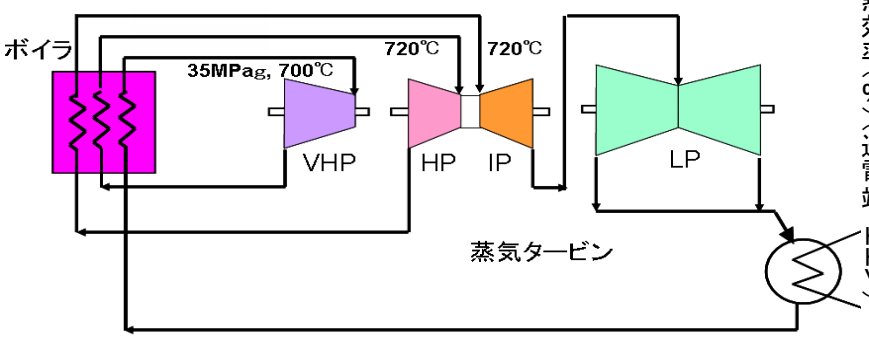
1.3. 施策の目的実現の見通し

○先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発

プロジェクト概要	プロジェクトのアウトプット	カスタマー	プロジェクトのアウトカム
CO2削減要求に対して、信頼性と経済性を両立し発電効率に優れたA－USCの開発	蒸気温度700℃級電力産業用大容量ボイラー・タービンシステムを伴うA-USCの技術を確立する。	民間企業（電力会社、重工メーカーおよびエンジニアリング会社）	蒸気温度700℃級（発電効率46%HHV）の従来型より高い熱効率を持つA-USC技術の商用化を2020年代に実現。

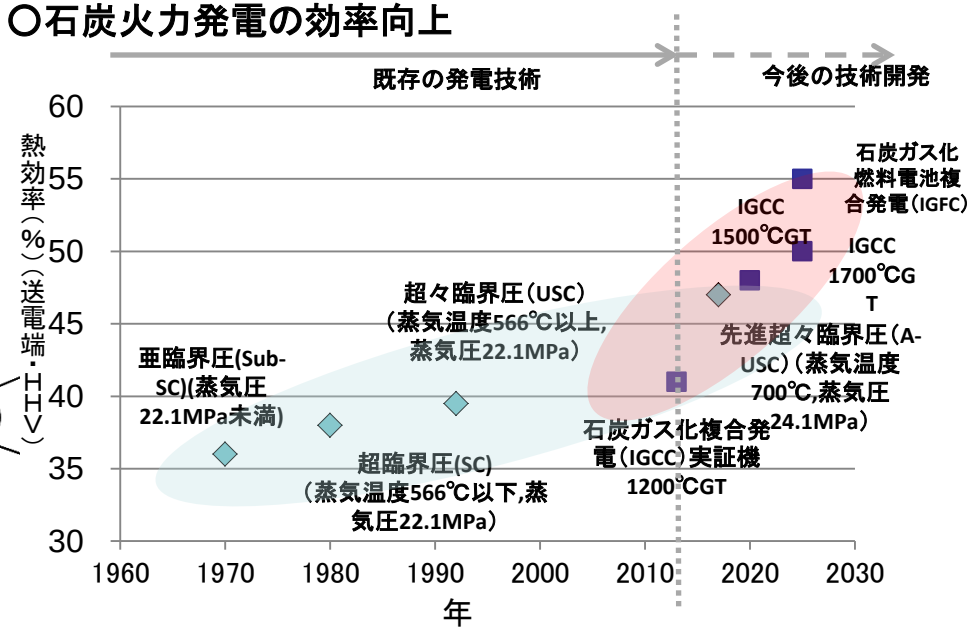
○ＡｰＵＳＣ設備概要図

（A-USC：Advanced-Ultra Super Critical、送電端効率46%(HHV)）



※VHP:超高圧（Very High Pressure）
HP:高圧（High Pressure）
IP:中圧（Intermediate Pressure）
LP:低圧（Low Pressure）

○石炭火力発電の効率向上



※送電端：発電所構内の所内消費電力を差し引いた電力
HHV: 高位発熱量基準（Higher Heating Value）

1.3. 施策の目的実現の見通し

〇イットリウム系超電導電力機器技術開発

プロジェクト概要

系統安定化や送電ロスの飛躍的低減によるCO2削減を可能（2020年に20万t-CO2/年）とするため、
①超電導電力貯蔵装置（SMES）
②超電導ケーブル
③超電導変圧器
の研究開発

プロジェクトのアウトプット

イットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器の実用化を見通すコイル化、大電流低交流損失化、高電圧電気絶縁技術、限流機能付加技術、システム化技術等重要な技術の開発

カスタマー

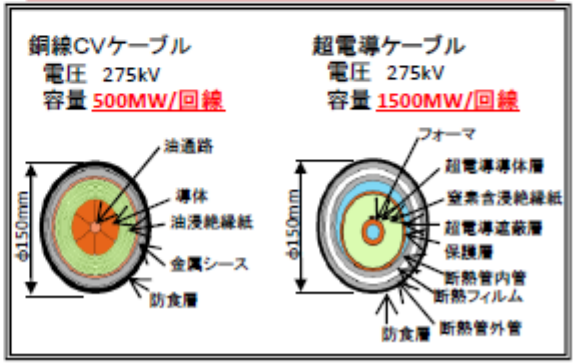
民間企業
（電力会社、重工メーカーおよびエンジニアリング会社）

プロジェクトのアウトカム

コンパクトで大容量かつ安定的な電力供給及び送電ロスの飛躍的低減によるCO2削減が期待できるイットリウム系超電導線材を用いた超電導電力機器の研究開発

事業イメージ

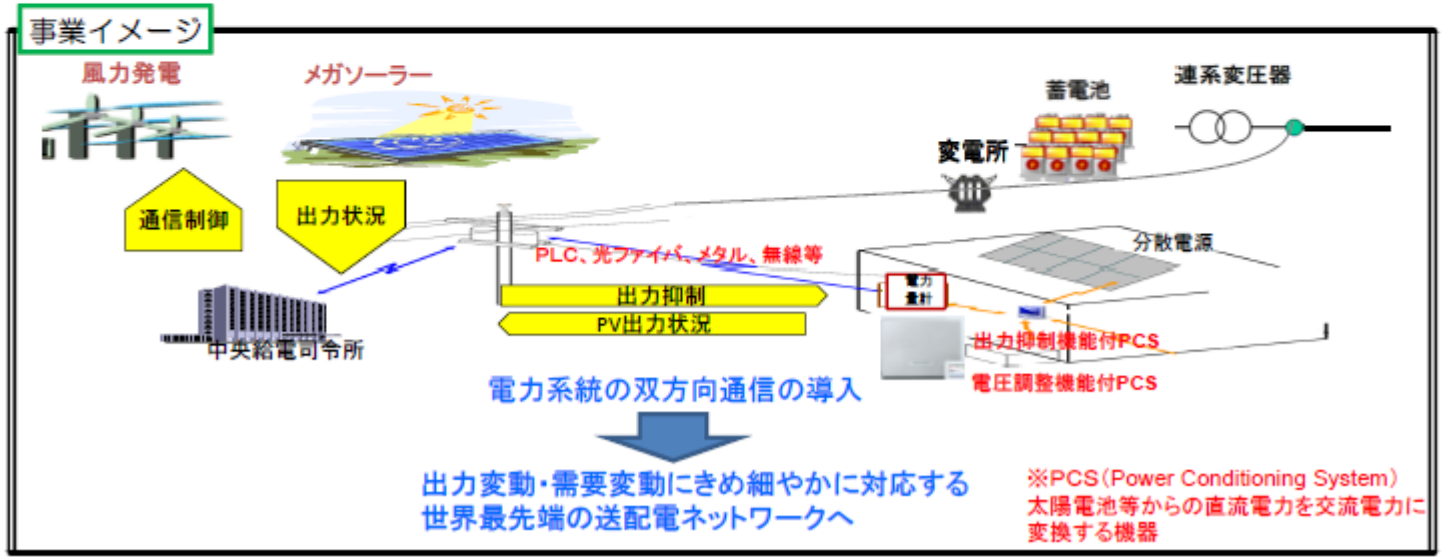
ケーブルの比較



1.3. 施策の目的実現の見通し

〇次世代型双方向通信出力制御実証事業

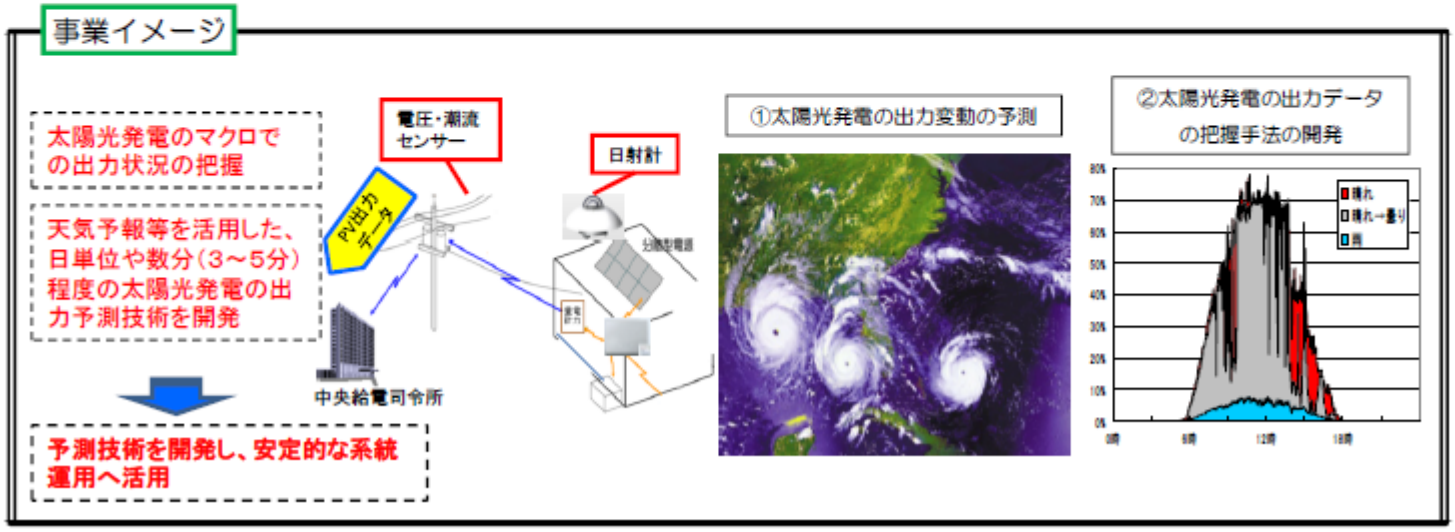
プロジェクト概要	プロジェクトのアウトプット	カスタマー	プロジェクトのアウトカム
太陽光発電の機械損失を最小限に抑えるため、出力調整を通信機能を用いて行い、電力系統の双方向通信技術による実証を行う	通信手段によりきめ細かな出力抑制機能が可能な直交変換装置（PCS）の開発や、太陽光発電や蓄電池システム等の効率的な制御を行うための各種双方向通信を実証。	民間企業（電力会社、重エメーカーおよびエンジニアリング会社）	出力抑制量を最小化し、太陽光発電等の大量導入に伴う系統安定化対策コストを抑制しつつ、太陽光発電等の大量導入と電力系統の安定化を実現する。



1.3. 施策の目的実現の見通し

○太陽光発電出力予測技術開発実証事業

プロジェクト概要	プロジェクトのアウトプット	カスタマー	プロジェクトのアウトカム
気候条件、配電系統における電圧・潮流センサー等を活用した太陽光発電の出力予測技術を開発し、系統運用へ活用する	既存の太陽光発電の出力データ等や気象情報等を活用し、現在確立されていない太陽光発電の出力状況把握や出力予測手法を開発	民間企業（電力会社、重エメーカーおよびエンジニアリング会社）	周波数調整、需給調整、再生可能エネルギー電源の有効利用への活用や待機電源の最小化などにつなげていく。



高効率ガスタービン実用化技術開発（1700℃級ガスタービン）の概要について

（H20年度～H23年度事業）

平成25年11月13日

資源エネルギー庁電力基盤整備課

三菱重工業株式会社

目　次

１．プロジェクトの概要

２．目的・政策的位置付け

３．目標

４．成果、目標の達成度

５．事業化、波及効果

６．研究開発マネジメント体制

７．中間評価結果

1．プロジェクトの概要

概　　要	電力産業の保守高度化とリプレース需要にあった大容量機の高効率化を目指し、目標コンバインド効率56%以上、CO2排出量8%削減（現状同容量機比）を達成するために必要な、1700℃級ガスタービンの実用化を図る。 そのため、1700℃級ガスタービンの実用化に必要な要素技術開発を行い、システムの成立性をシミュレーションにより確認する。
実施期間	平成20年度～平成23年度　（4年間）
予算総額	22億円（補助率：3分の2） H20 / H21 / H22 / H22　年度 3.2 / 5.6 / 6.2 / 6.9　億円
実　施　者	三菱重工業株式会社
プロジェクトリーダー	伊藤　栄作　　三菱重工業株式会社　（主席研究員）

2. 目的・政策的位置付け

- 世界の温室効果ガスの排出を2050年までに半減するという長期目標を達成するため、革新的な技術開発の重要性が掲げられており、その中で、天然ガス利用の高度化として高温ガスタービンを用いた高効率火力発電技術の実用化を目指す事が定められている。

- 経済産業省は、「Cool Earthーエネルギー革新技術計画」を設定（平成20年3月5日）し、その中で「高効率天然ガス火力発電」が含まれており、着実な技術開発が必要である。

- エネルギー基本計画(平成22年6月18日閣議決定)において、「その他の火力発電については、新増設・更新の際には、原則としてその時点における最先端の効率を有する設備の導入を目指す。」と謳われており、1700℃級ガスタービンに代表される超高温高効率ガスタービンは、現状最も高効率の火力発電技術として、リプレースにおける大容量機のエネルギー効率向上に寄与できる技術である。

技術ロードマップ

2. 高効率天然ガス発電

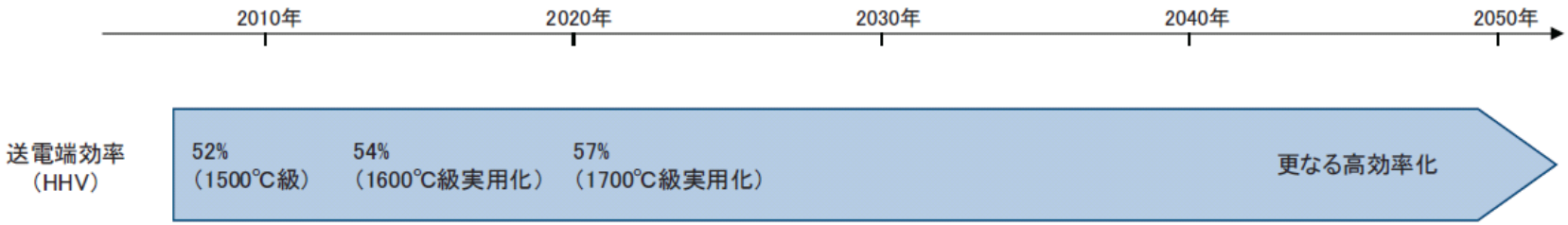
技術の概要

○高効率天然ガス発電技術としては、ガスタービン及び蒸気タービン複合発電技術や、開発中の高湿分空気利用ガスタービン技術（AHAT）がある。
○我が国では1600℃級のガスタービンの開発が完了し、2013年10月より関西電力の姫路第二発電所にて営業運転を開始予定（発電効率54%、送電端・HHV）。
○将来CCSが商用化し、導入されれば、二酸化炭素排出をほぼゼロにすることが可能。
○IEA はEnergy Technology Perspectives2010の(世界のエネルギー起源CO_2の排出量を2050年に2005年比で半減させる)ブルーシナリオにおいて、天然ガス火力発電で2.8億トン程度のポテンシャルがあると試算。

我が国の技術開発の動向・課題

○我が国は、コンバインドサイクル発電に関して、2013年頃に1600℃級で54%、2020年頃には1700℃級で57%の発電効率（送電端・HHV）を達成することを目指している。また、トリプルコンバインドサイクル発電システムについて、要素技術開発を実施している。
○AHATについては、2020年頃までに10万kW級で51%（送電端・HHV）の発電効率を実現することを目標としている。
○1700℃級ガスタービンの開発では、超高耐熱合金をはじめとする高温耐熱性タービンの開発等が主要な課題となっている。この課題を解決し、現状最大52%の発電効率（送電端・HHV）を57%（2020年頃）まで上げることが目標。
○AHATについては、高効率圧縮機設計技術やタービン翼冷却技術の開発が必要である。

技術ロードマップ



○ガスタービン技術は、空力、熱力、燃焼、材料等の広範囲で高度な設計技術・製造技術を有することから、産学官の連携の下、技術開発を進めることが重要（大学等における材料や触媒技術等の基礎研究と、民間主体のプラントをシステムとして実証する大型プロジェクトの連携を強化）
○幅広い人材の育成による技術開発の推進

国際動向

普及の現状
○米国では、2013年にフロリダ州において、発電効率（送電端・HHV）が約54%となる高効率ガスタービンの営業運転が開始される予定。

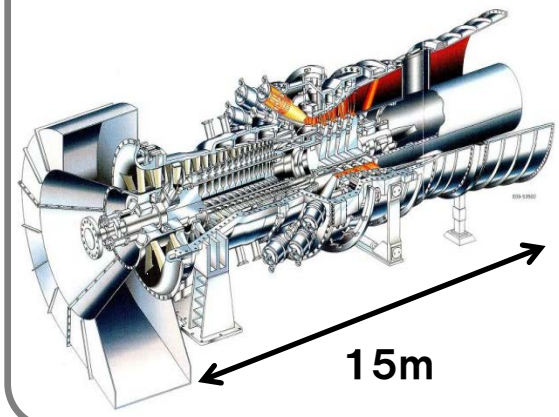
技術開発の動向
○米国エネルギー省(DOE)の国家プロジェクトでは、ガスタービンメーカーや大学に2003年から2015年にかけて約1,000億円を投資して、高効率化を目指している。
○欧州では、CAME-GTと呼ばれるイニシアチブの中で高効率ガスタービンの開発が推進され、現在は第7次研究枠組計画（FP7）の中で個別の技術要素の改良に向けた研究開発が実施されている。

我が国の国際競争力
○我が国では、入口ガス温度を1600℃まで高め世界最高水準の発電効率（送電端・HHV）54%を実現した「1600℃級複合発電」が2013年10月頃に営業運転が開始される予定であり、我が国の技術開発レベルは世界最高水準にある。
○ガスタービンの高温化はスピードが非常に速く、1980年代初頭の複合発電システムの導入以降、年間約20℃という早いペースで燃焼温度の高温化が進み、熱効率が改善してきた。熾烈な開発競争の中、高温化に対して技術的に開発が可能な国は、米・独・日の 3 カ国に絞られつつある。

ガスタービンの特徴

高度な技術が必要で、国際競争が激化

作動原理と特徴　コンパクト＆大出力



- 圧縮機
  - 空気を吸い込み、圧縮
- 燃焼器
  - 超高温・高エネルギーの燃焼ガスを作る
- タービン
  - 回転エネルギーに変換

高度な技術が必要

- 超高温
  - 1600-1700degC
  - 超合金の融点　約1350℃
- 超高速
  - 500m/s以上の回転速度
  - ⇒10,000Gを超える遠心力
- 長時間運用
  - 1年以上の連続運用も可能

超高効率ｶﾞｽﾀｰﾋﾞﾝの特長

- 火力発電の中で最も高効率
  - 熱効率　＞60%　　Cf　石炭火力 約 45%
- 低エミッション
  - CO2< 0.31kg/kwWh　Cf　石炭火力の1/2.5
- フレキシブルな運用が可能
  - 自然エネルギーの発電量の変動を補完
- 多様な燃料を使用可能
- 技術展開のバリエーションが豊富
  - IGCCなど、

技術の波及効果が大きい

- 市場規模が大きい　2-3兆円
- 産業の裾野が広く、雇用に貢献
- 技術開発が、市場シェアに直結する。

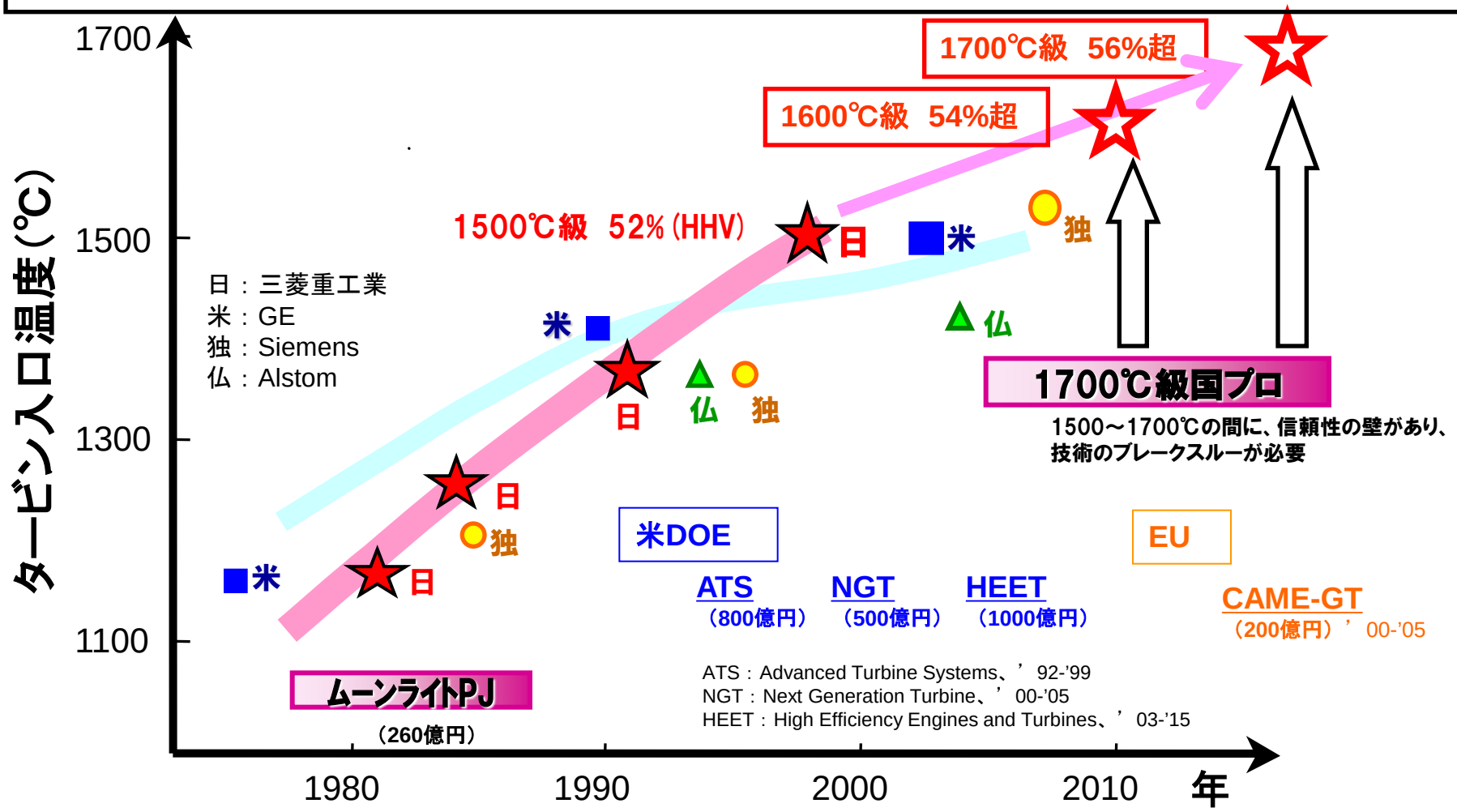
過酷な国際競争

- 各国のフラッグシップ技術
  - 科学技術分野で、航空宇宙技術と並ぶ重要技術
- 各国の経済/エネルギー政策の重要技術

欧米各国との競争

欧米vs日本　ガスタービンの高温化（高性能化）競争で優位性を維持

- わが国は、世界に先駆けて1500℃級を実用化し、本分野をリードしている。
- 欧米は巨額の研究開発費を投じており、日本は手を緩めるとすぐに競争力を失う。
- 優位性を維持するため、1700℃級に必要な革新的技術開発に取り組み、早期に実用化する事が必要である。



国の関与の必要性

火力発電の高効率化のためには、革新的な技術開発が必要だが、

- 研究開発成果の商業性や投資回収可能性に係るリスクが大きく、民間企業だけでは対応できない研究開発分野である。
- 実用化まで長期のリードタイムと多大な研究開発投資を必要とする技術開発を推進するには、官民がその方向性を共有する事が不可欠である。

●大型ガスタービンの高温化は、日本が世界をリードしてきた。

●海外にも先例が無い。

⇐

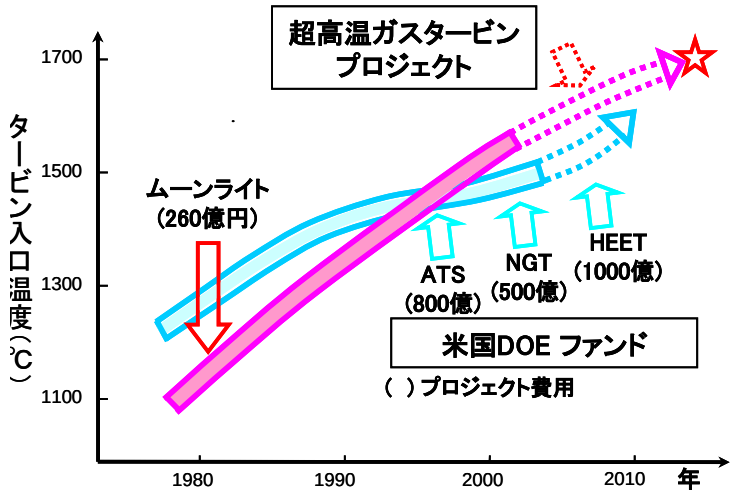
ムーンライト
‘78～’87　260億の予算で実施。
●高温化技術の遅れを挽回した。
●開発技術を活用して、
’90　1350℃級　実用化
’97　1500℃級　実用化
以降高温化で世界をリード

⇩

したがって、未知の事象が想定され開発リスクが高い。

⇩

産学共同で、最新の基礎技術を投入しつつ進める為に、是非とも国の関与と支援が必要である。



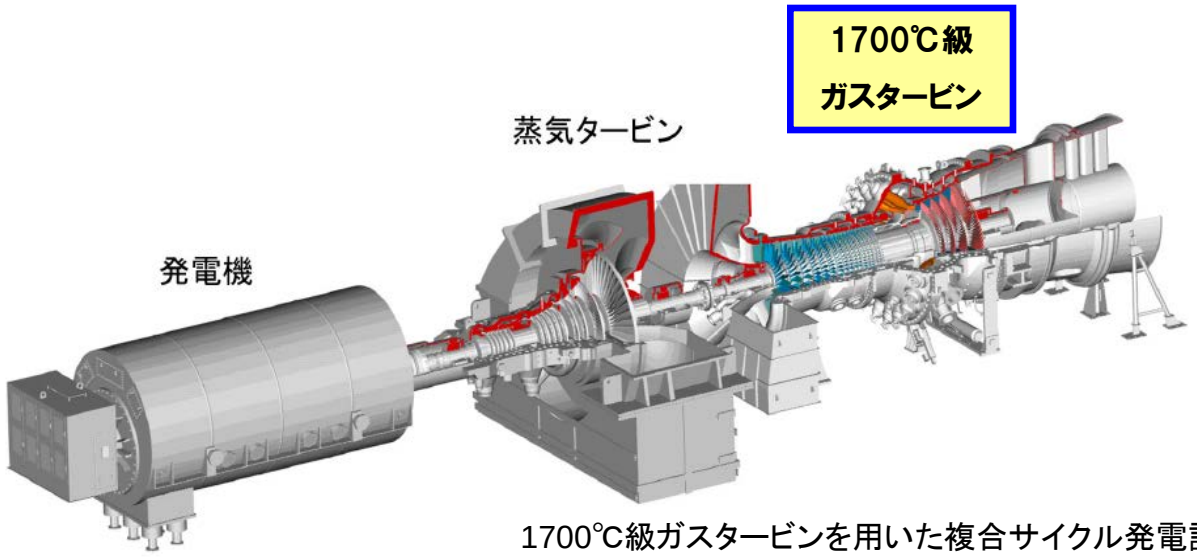
ガスタービンのタービン入口温度の上昇

施策の目的実現の見通し

高効率ガスタービンの実用化技術開発（1700℃級ガスタービン）

プロジェクトのアウトプット	カスタマー	直接アウトカム	中長期のアウトカム
プロジェクトの概要 1700℃級ガスタービン実現の為に必要となる実用化技術の開発。	より実機に近い条件下での各技術の実現性の評価	民間企業（電力会社及び重工メーカー）	燃焼器、タービン、圧縮機をモジュールレベルで検証	1700℃級ガスタービンの実現

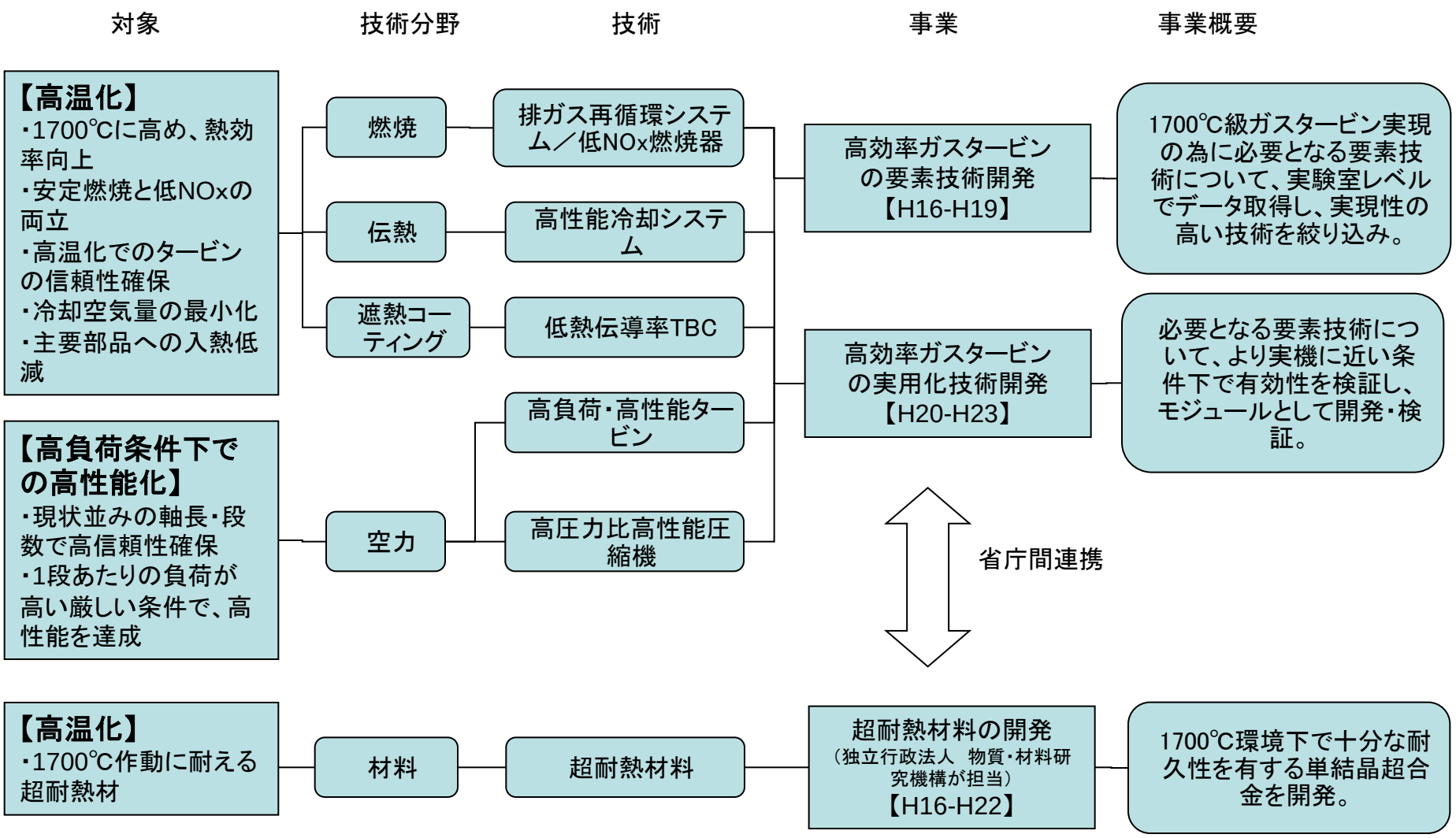
効果が確認された要素技術を活用して、1600℃級ガスタービンを開発



1700℃級ガスタービンを用いた複合サイクル発電設備のイメージ

施策の構造

送電端効率56%HHVを達成を目指し、燃焼温度を高めた1700℃級ガスタービンを実現するキー技術を開発する。



3. 目標

全体目標

コンバインド効率56%以上（送電端、HHV）を達成する。
1700℃級ガスタービンに適用可能な実用化技術を開発する。

目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
1. 実機を設計するために必要な要素技術を、より実機に近い条件で評価・検証する。 2. 新開発の要素技術を適用した場合に、送電端効率56%以上（HHV）を達成可能であることの目処を得る。 3. 高圧高温試験用の装置を製作し、実機相当条件でNOx50ppm以下を安定的に実現できることを確認する。	より実機に近い条件で新技術を評価することにより、技術課題を明確にする。新たに判明した課題に対して、改良案を立案し、速やかに改良効果を確認することにより、実機開発のリスクを低減する。

個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
①排ガス再循環システム／低NOx燃焼器の開発	高圧燃焼試験装置を製作し、1700℃実機相当圧でNOx排出量50ppm以下の実現可能性を確認する。	従来の脱硝装置を大幅に増強することなく、煙突出口NOxを従来並みにするNOxとして設定した。
②高性能冷却システムの開発	冷却要素に対する回転、乱れなどの影響を評価し、冷却空気量30%低減（事業発足時比）の実現可能性を確認する。	送電端効率56%(HHV)達成のため、各要素効率は、信頼性と性能を両立しつつ、世界最高レベルの目標となるよう、各要素目標値に割り振った。
③低熱伝導率遮熱コーティングの開発	遮熱効果を現状材(YSZ)より20%低減可能な候補材を選定し、実翼への最適な成膜条件を求める。 実機相当熱サイクル疲労試験にて耐久性を確認する。	
④高負荷・高性能タービンの開発	モデルタービンを用いて効率を計測し、1500℃級に比べ30%高い負荷条件において、１軸タービン、段数従来並みで、効率91%以上の実現が可能か確認する。 3次元設計について、空力・伝熱への影響を把握する。	
⑤高圧力比高性能圧縮機の開発	モデル圧縮機で効率レベルを計測し、圧力比30以上において、１軸圧縮機、段数従来並みで、効率89%以上の実現が可能か確認する。 起動特性や抽気室の空力特性への影響を評価する。	

4. 成果、目標の達成度

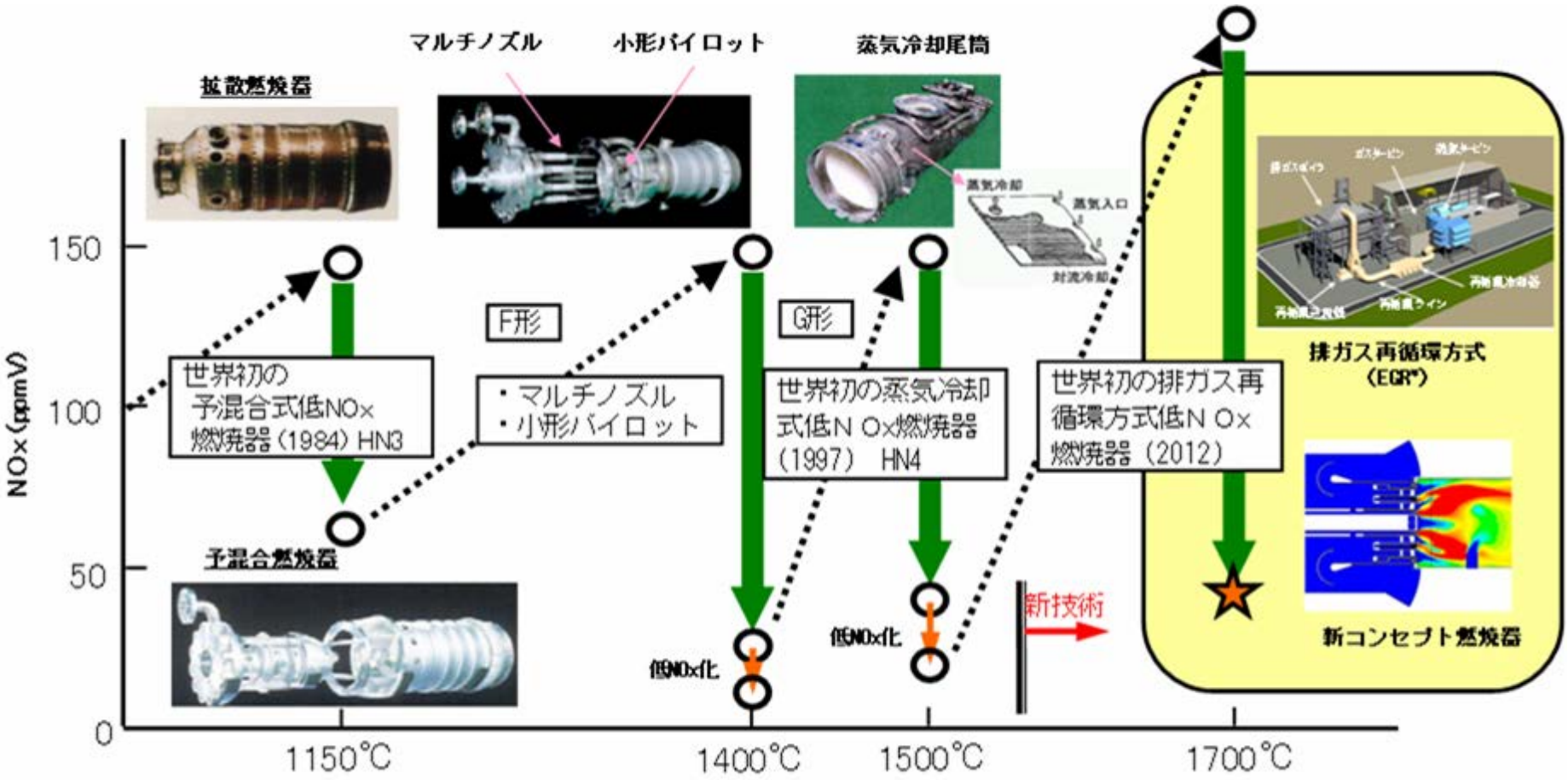
要素技術	目標・指標	成　果	達成度
全体目標	コンバインド効率56%以上（送電端、HHV）	最新のデータを反映した予想値は56%（HHV）を上回る目途を得た。	達成
①排ガス再循環システム／低NOx燃焼器の開発	NOx排出量50ppm以下	実機相当圧力でNOx排出量16ppmを確認した。	達成
②高性能冷却システムの開発	冷却空気量30%低減（事業発足時比）	冷却空気量30%低減（事業発足時比）の目処を得た。	達成
③低熱伝導率TBCの開発	遮熱効果を現状材(YSZ)より20%向上	遮熱効果を現状材(YSZ)より20%向上低減した。	達成
④高負荷・高性能タービンの開発	1500℃級ガスタービンに比べ30%高い負荷条件において、１軸タービン、段数従来並みで、効率91%以上	回転翼列試験により91.3%の効率達成の目処が得られた。	達成
⑤高圧力比高性能圧縮機の開発	圧力比30以上において、１軸圧縮機、段数従来並みで、効率89%以上	回転翼列試験により、89.3%の効率達成の目処が得られた。	達成

研究開発　実施工程の実績

		H20年	H21年	H22年	H23年
⑤	高圧力比高性能圧縮機	前方段モデル試験 中間段モデル試験	改良設計	改良モデル圧縮機試験	圧縮機モジュール試験
④	高負荷高性能タービン	高圧段モジュール試験 高精度流動解析	低圧段モジュール試験	改良モジュール試験	
②	高性能冷却システム	冷却コンセプト検討 実用化モジュール試験装置検討	高圧高温翼列設計	供試翼、試験装置製作 中圧高温翼列試験	高温高圧翼列試験
①	排ガス再循環システム／低NOx燃焼器の開発	燃焼器基本計画 高圧燃焼装置基本計画	実用化サイクルシステム検討 実用燃焼器製作 詳細設計	高圧燃焼装置製作	高圧燃焼試験
③	低熱伝導率遮熱コーティング	経年変化特性評価 実用化溶射条件　及び　寿命評価技術	材質改良	試験翼への成膜 高品位実用化成膜技術	
	予算額（百万円）※	324	559	615	689

①－１　排ガス再循環システム／低NOx燃焼器

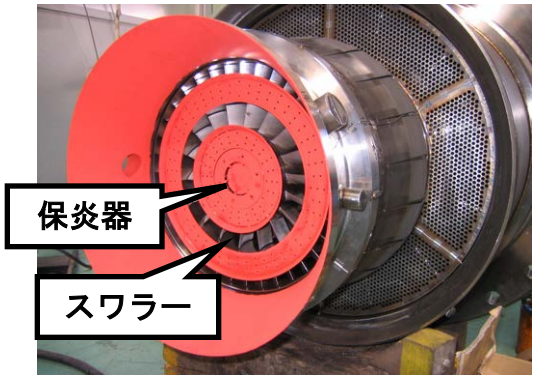
燃焼器出口ガス温度の上昇に対し、NOxは指数関数的に上昇するが、新技術の適用により低NOx化を達成してきた。



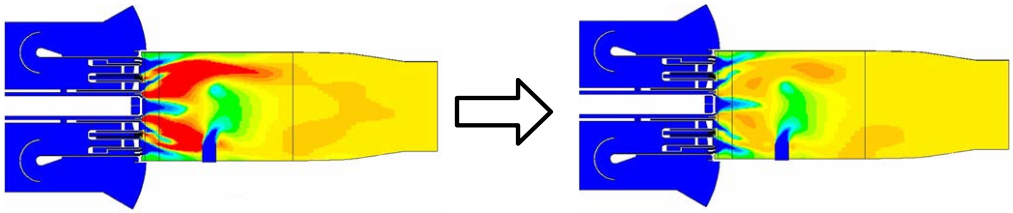
①-２　排ガス再循環システム／低NOx燃焼器

排ガス再循環を模擬できる高圧燃焼試験を製作し燃焼試験を実施。NOx は実機換算で16ppm @ 15%O2（＜目標50ppm）を達成する見込みを得た。

新コンセプト試作燃焼器

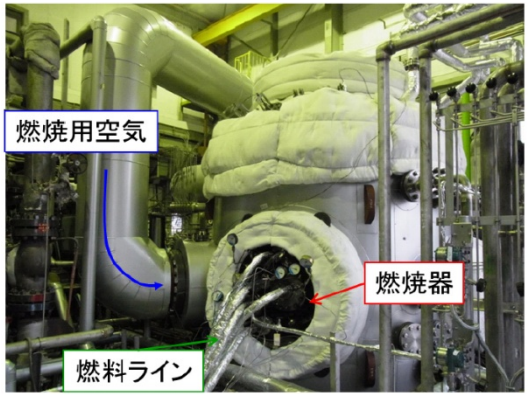


低酸素燃焼による局所の燃焼温度の低減

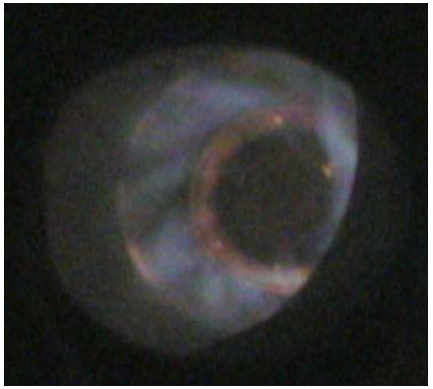


EGR無し (O2=21%)　　EGR有り (O2=15%)

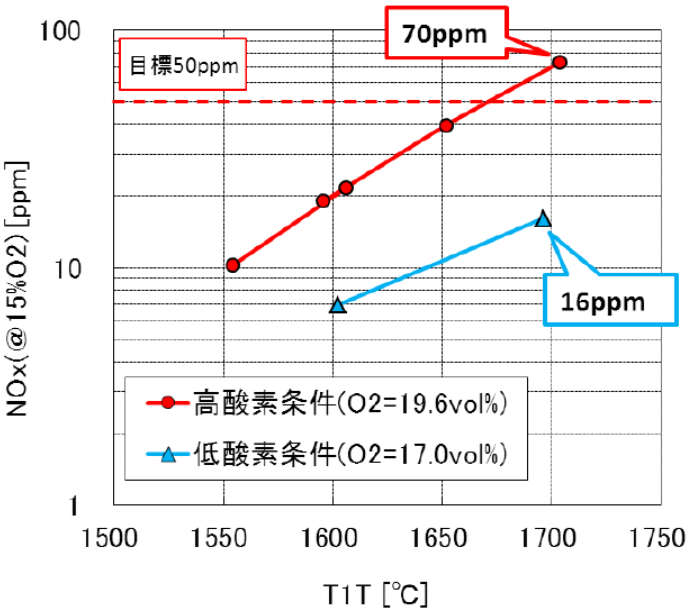
高圧燃焼試験設備



燃焼状況

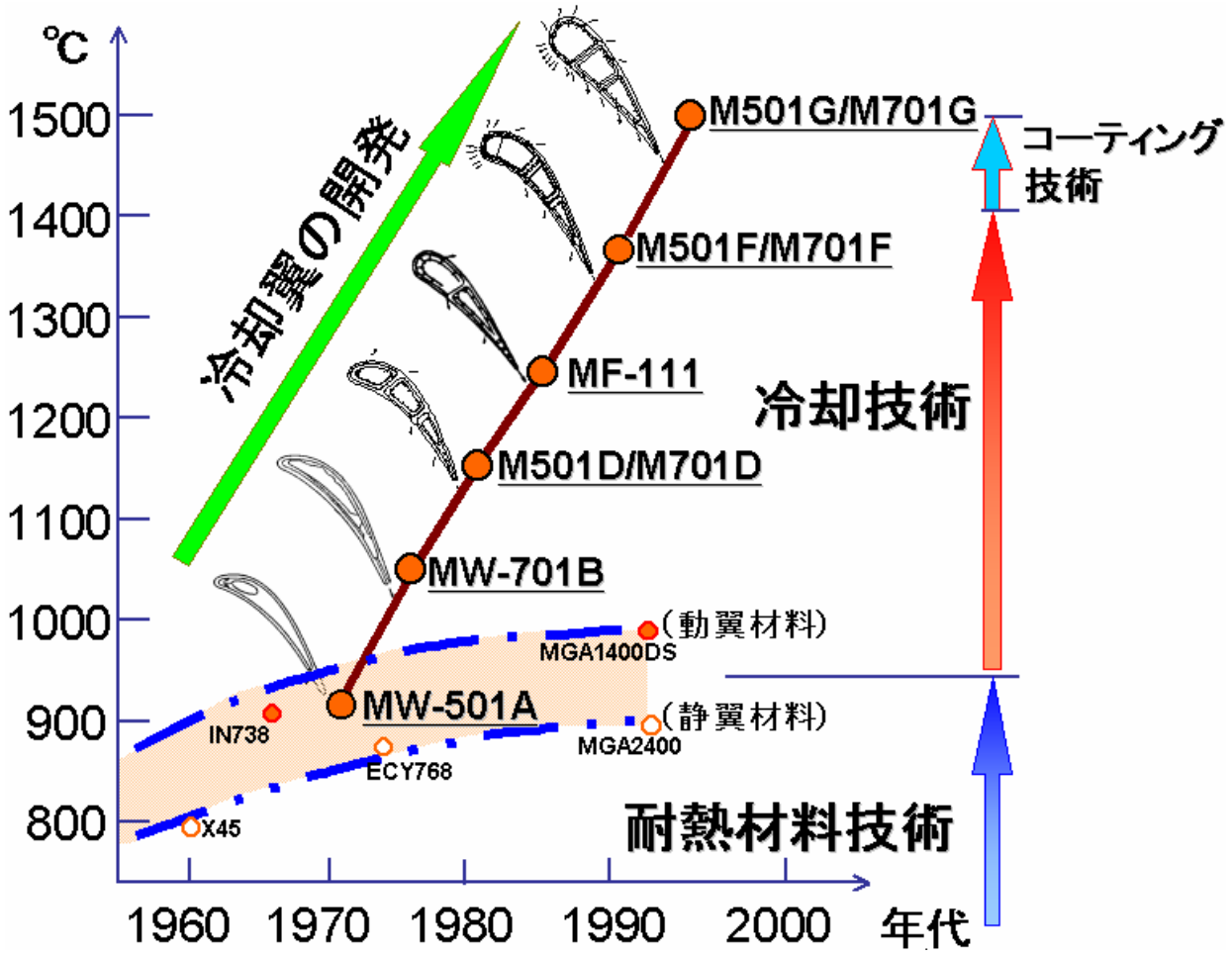


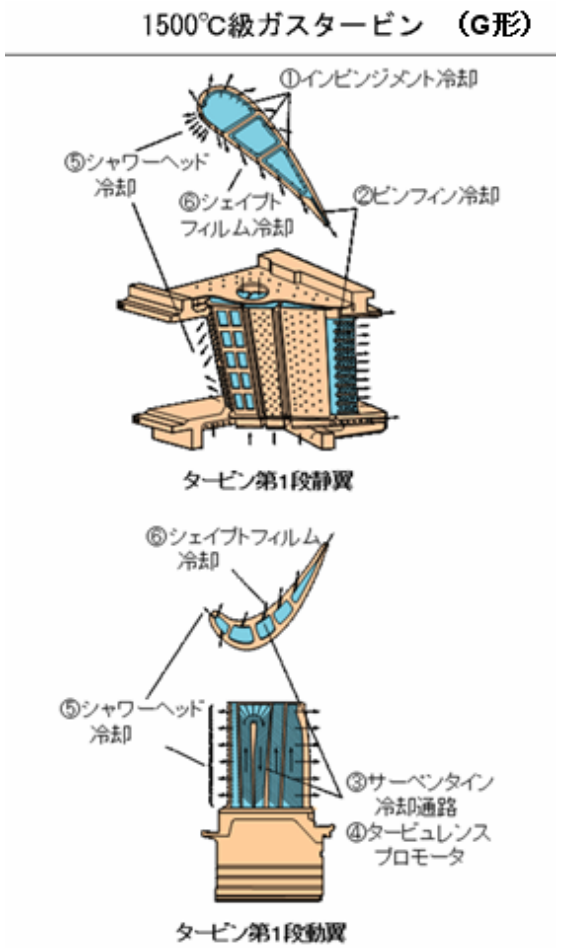
NOxの計測値



②－１　高性能冷却システム

高温化に対する冷却技術の役割

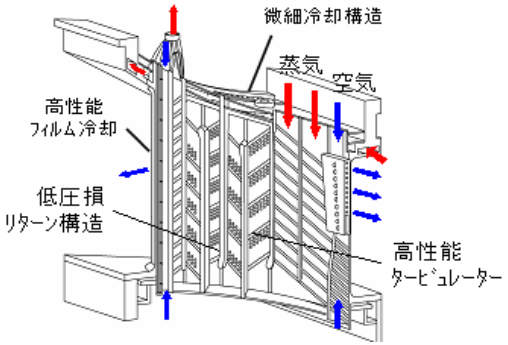




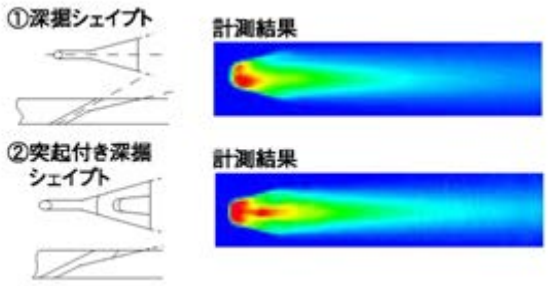
②－２　高性能冷却システム

先進冷却要素技術を開発し、実機を模擬した条件において、フィルム冷却効率を把握した。また、高温高圧燃焼場において冷却性能を実測し、所定のメタル温度以下であることを確認し、従来機に比べ、冷却空気量30%削減の目処を得た。

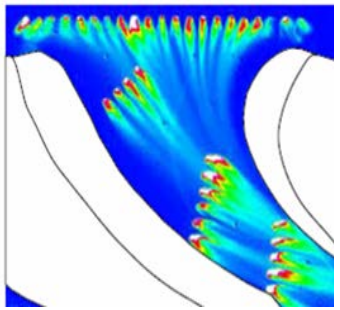
1700℃級冷却コンセプト例



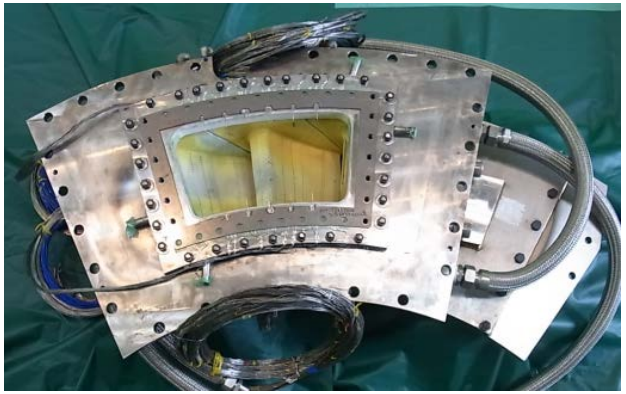
先進冷却要素の開発例

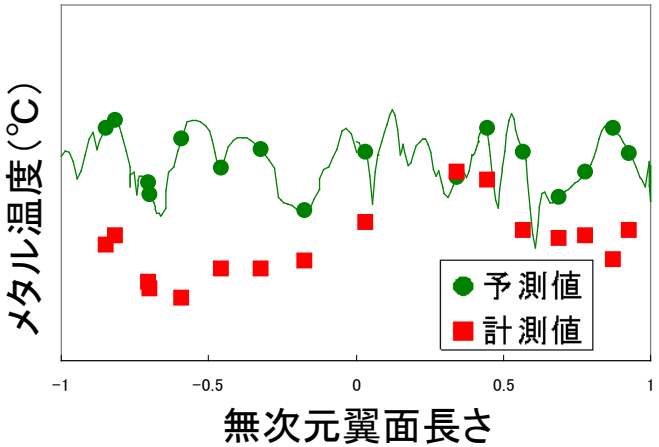


回転試験での冷却効率



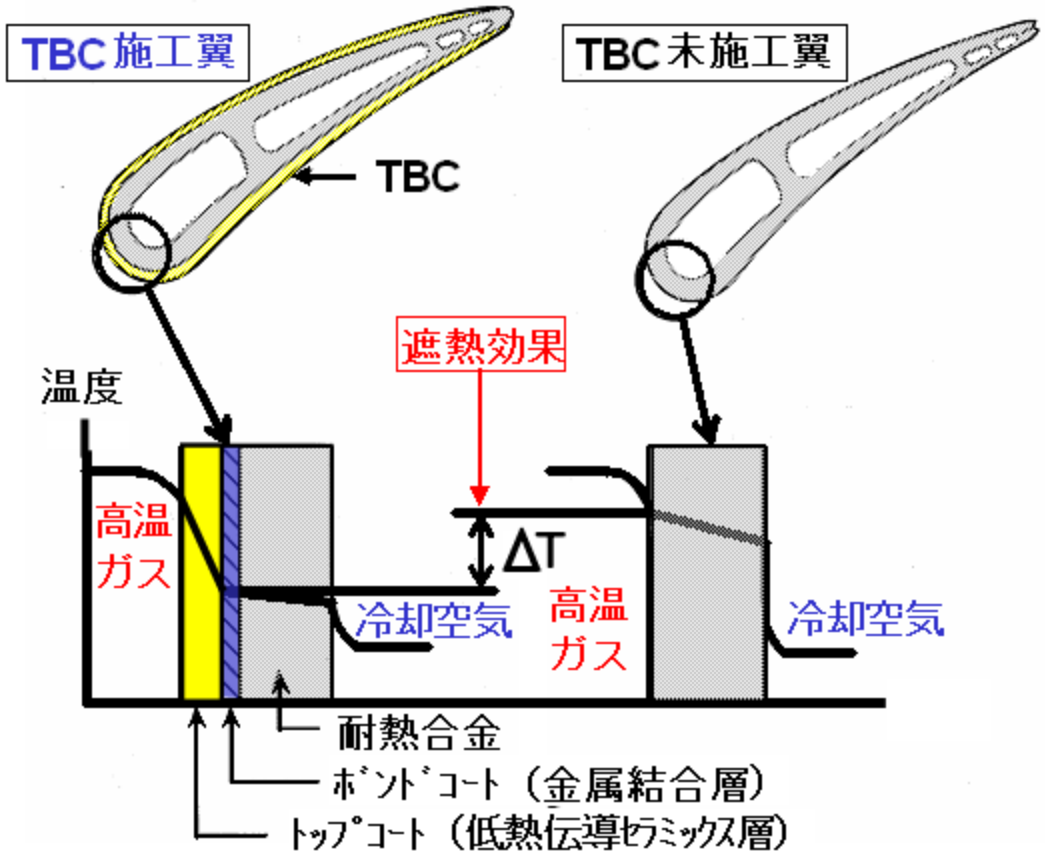
高温高圧燃焼場での試験結果

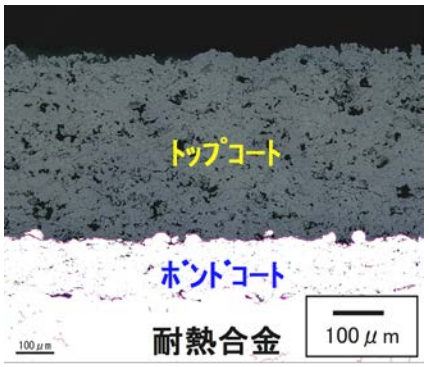




③－１　低熱伝導率遮熱コーティング

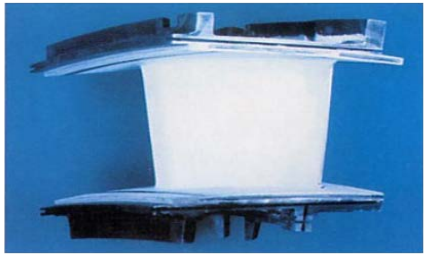
遮熱原理とTBC施工翼の例





TBCのミクロ組織

動翼



静翼

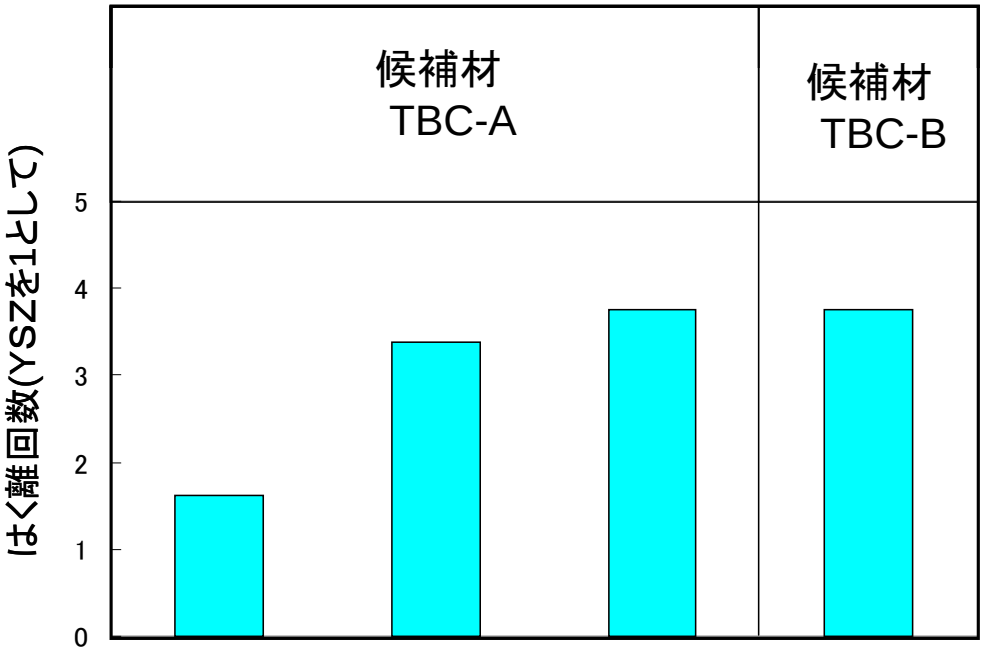
低圧蒸気タービン

③－２　遮熱コーティングの熱サイクル耐久性
（CO_2レーザ熱サイクル試験）

遮熱効果を20%向上したセラミクス材（目標を満足）を開発し、実機ガスタービンと同様に温度勾配を付与するため、CO_2レーザを用いた熱サイクル試験を実施し、先進セラミクスを用いたTBCの耐久性は通常のYSZと同等以上であることを確認しました。

(a) ﾚｰｻﾞ 熱ｻｲｸﾙ試験装置

(b) 熱ｻｲｸﾙ試験状況



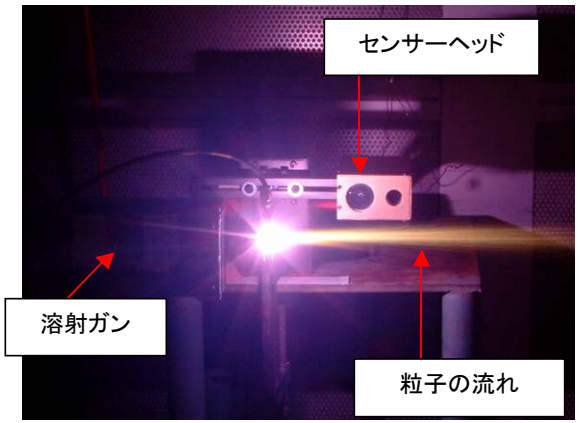
（ｃ）熱ｻｲｸﾙ試験結果（最高TBC表面温度：1400℃
ＴＢＣ内温度差：500℃）

③－３　遮熱コーティングの施工条件の最適化

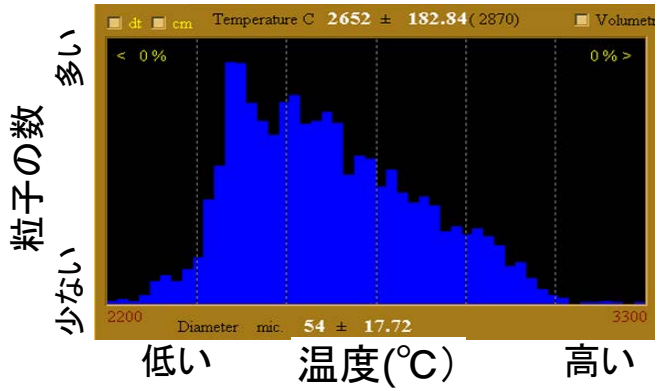
開発したセラミクス材を用いて、実翼への施工を想定した溶射条件の最適化を実施しました。

実翼へのプラズマ溶射施工状況

プラズマ溶射施工条件の最適化



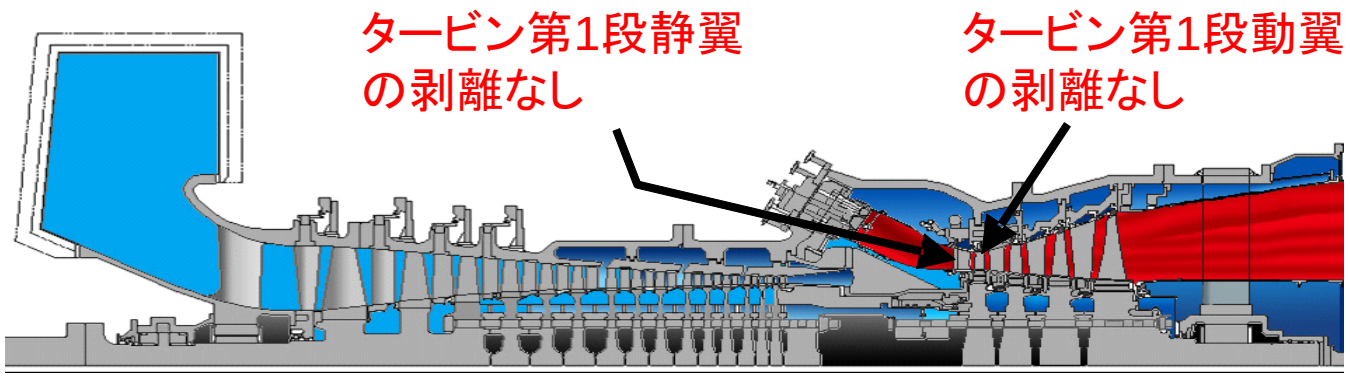
プラズマ中のパウダーの温度分布



③－４　遮熱コーティングの1600℃級ガスタービン適用

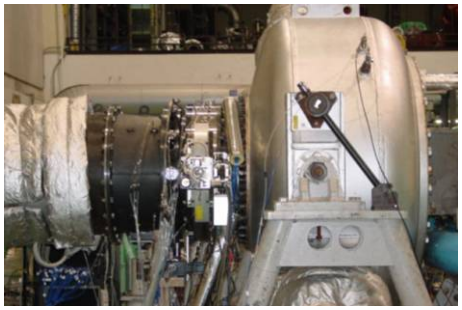
開発したセラミクス材を第１段動・静翼に施工し、1600℃級ガスタービンにおいて長時間の耐久試験を実施しました。その結果、剥離などの問題が発生しないことを確認した。

1600℃級ガスタービンでの第１段動・静翼　遮熱コーティングの運転後点検結果



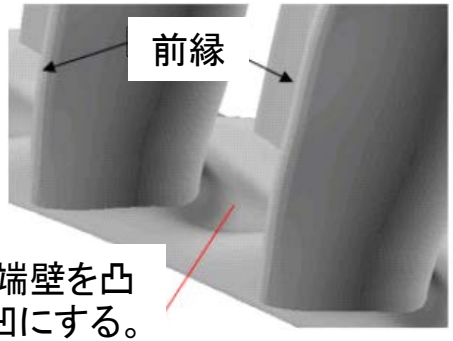
④－１　高負荷・高性能タービン

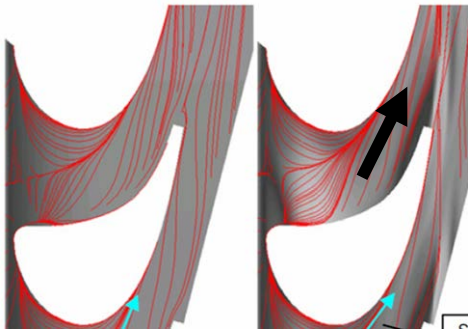
実機流れを模擬した回転試験に加え、実レイノルズ数での高速翼列試験を実施し、先進3次元設計コンセプトを検証しました。その結果、実機相当で効率91.3%（＞目標91%）を達成可能である目処を得た。



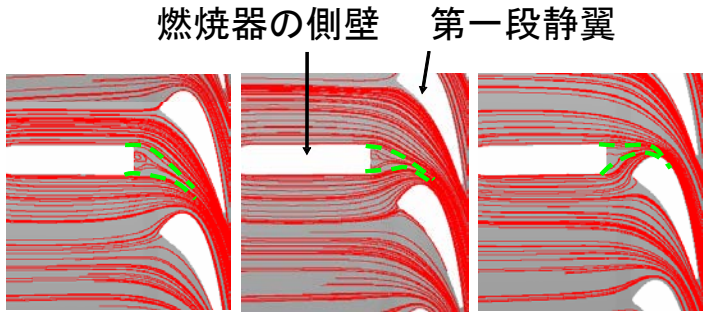
高速回転翼列試験装置

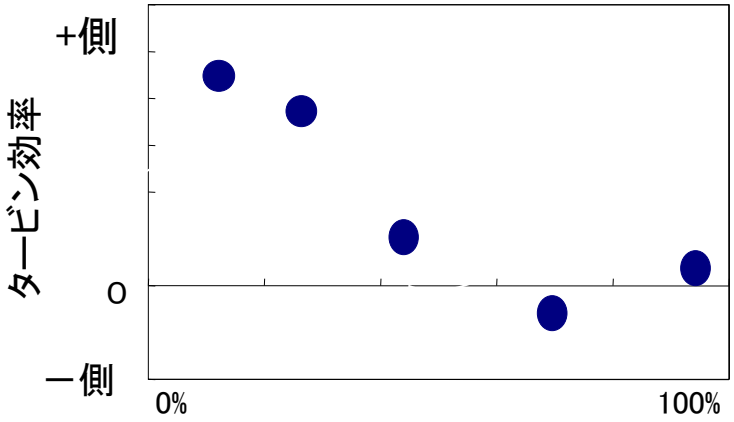
先進3次元設計コンセプト





燃焼器とタービンの配置最適化

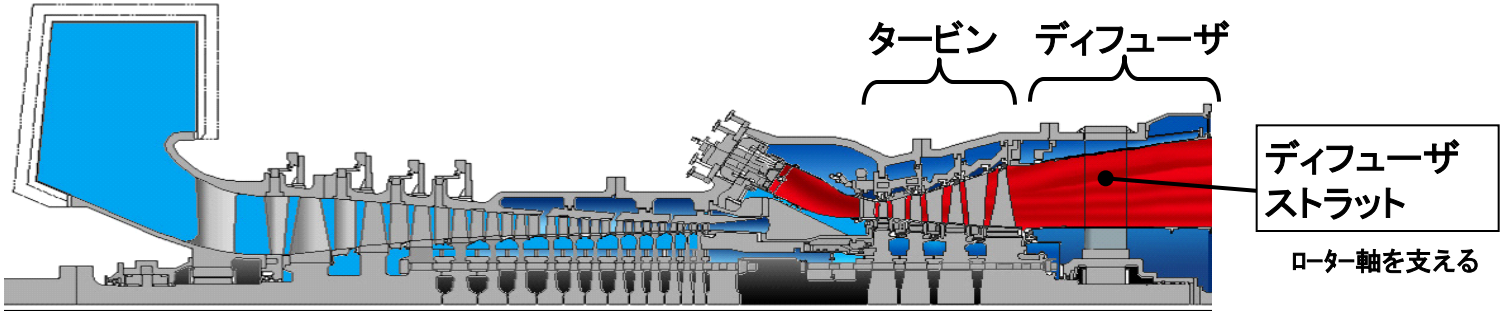




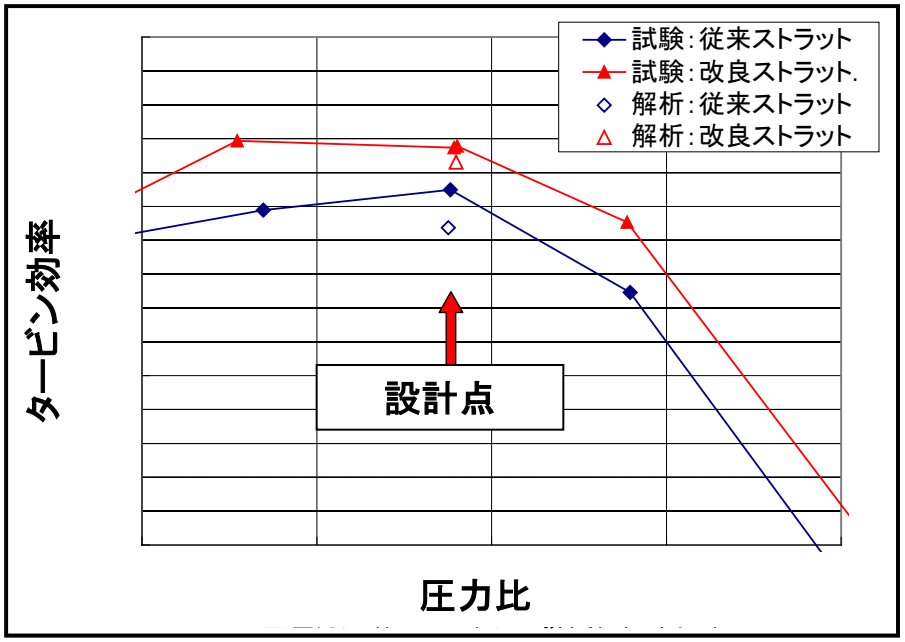
燃焼器に対する第一段静翼の相対位置

④－２　ディフューザストラット形状の改良

ディフューザストラットの断面形状を最適化することで、タービン全段効率が向上することを試験にて確認した。



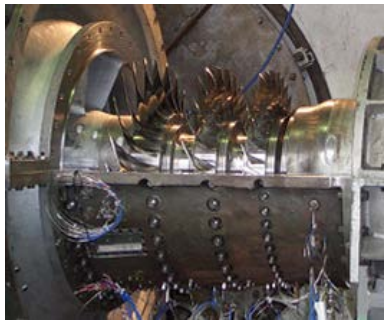
断面形状の最適化によるタービン効率向上



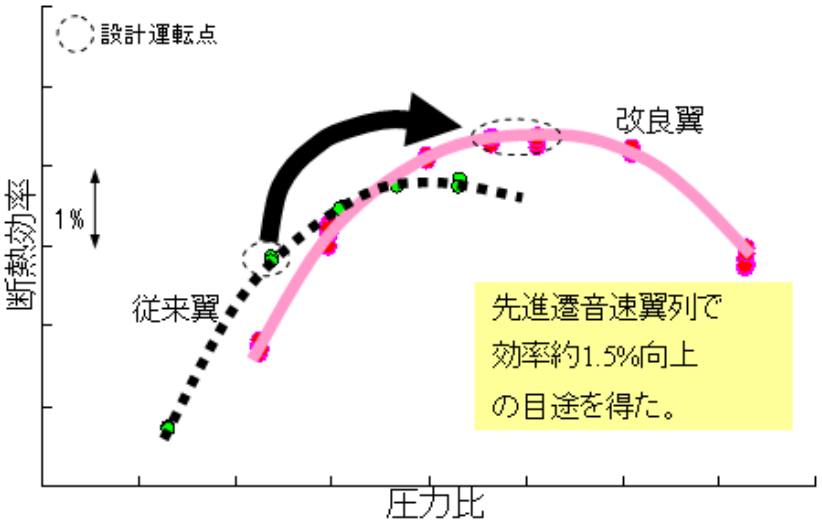
⑤－１　高圧力比高性能圧縮機

先進3次元空力設計技術により、遷音速段では衝撃波を制御、亜音速段では2次流れを制御することにより、いずれも性能を約1%以上向上しました。高速回転翼列試験により、実機での効率は89.3%（＞目標89%）を達成可能である事を確認しました。

さらに、起動条件も含めた運用性の確認を行ないました。

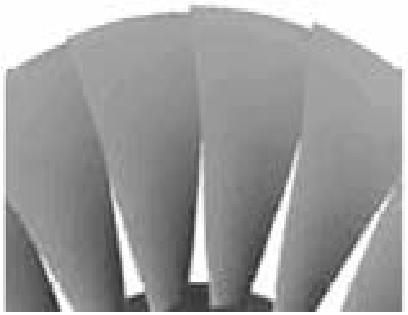


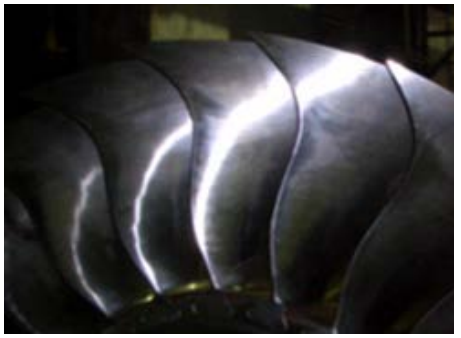
高速回転翼列試験設備

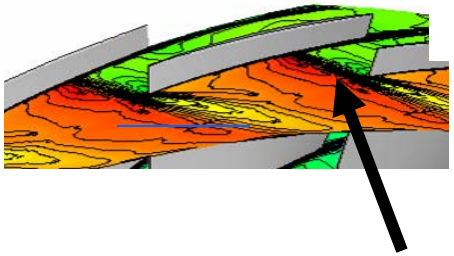


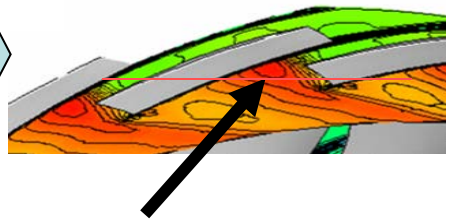
性能改善

従来翼　　先進3次元翼







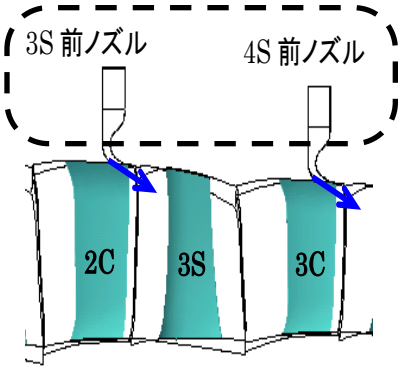


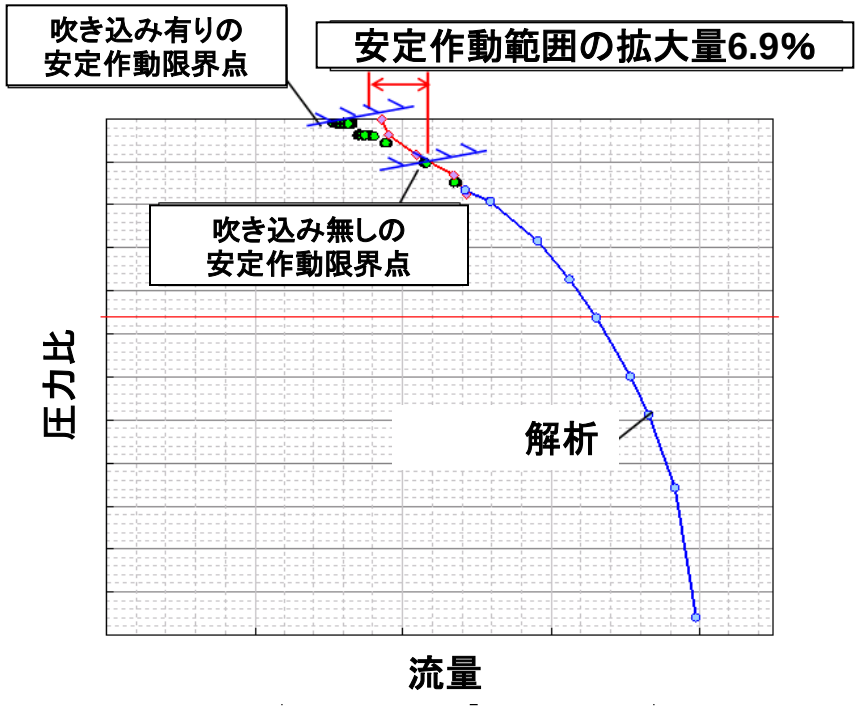
衝撃波を弱めて性能向上

⑤－２　圧縮機翼先端への空気吹き込みによる安定作動範囲の拡大

安定作動範囲の拡大を狙い、翼の先端に空気を吹き込む方式を採用し、安定作動範囲を6.9%拡大できる結果を得た。

翼先端への空気吹き込み



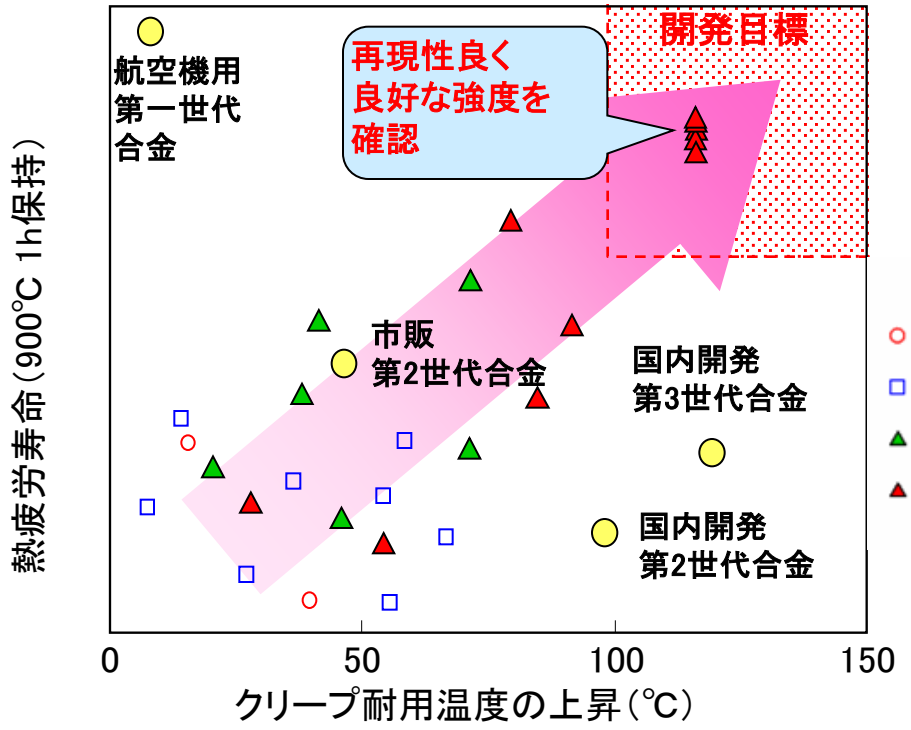


（参考）超耐熱材料の合金組成

目標を満足する組成を開発しました。（特許取得済み）

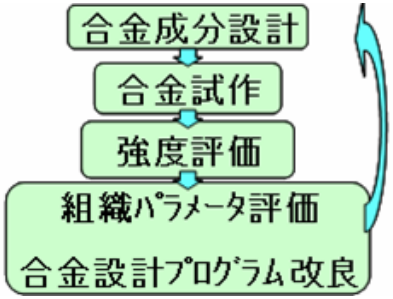
・高温特性 ； ｸﾘｰﾌﾟ耐用温度100℃UP
・鋳造技術 ； 鋳造欠陥の抑制
・経済性 ； レアメタル(Re)添加量を考慮し低コスト化

	Co	Cr	Mo	W	Al	Ti	Ta	Hf	Re
抽出合金	9	6.5	0.6	6	5.5	0	10	0.1	3

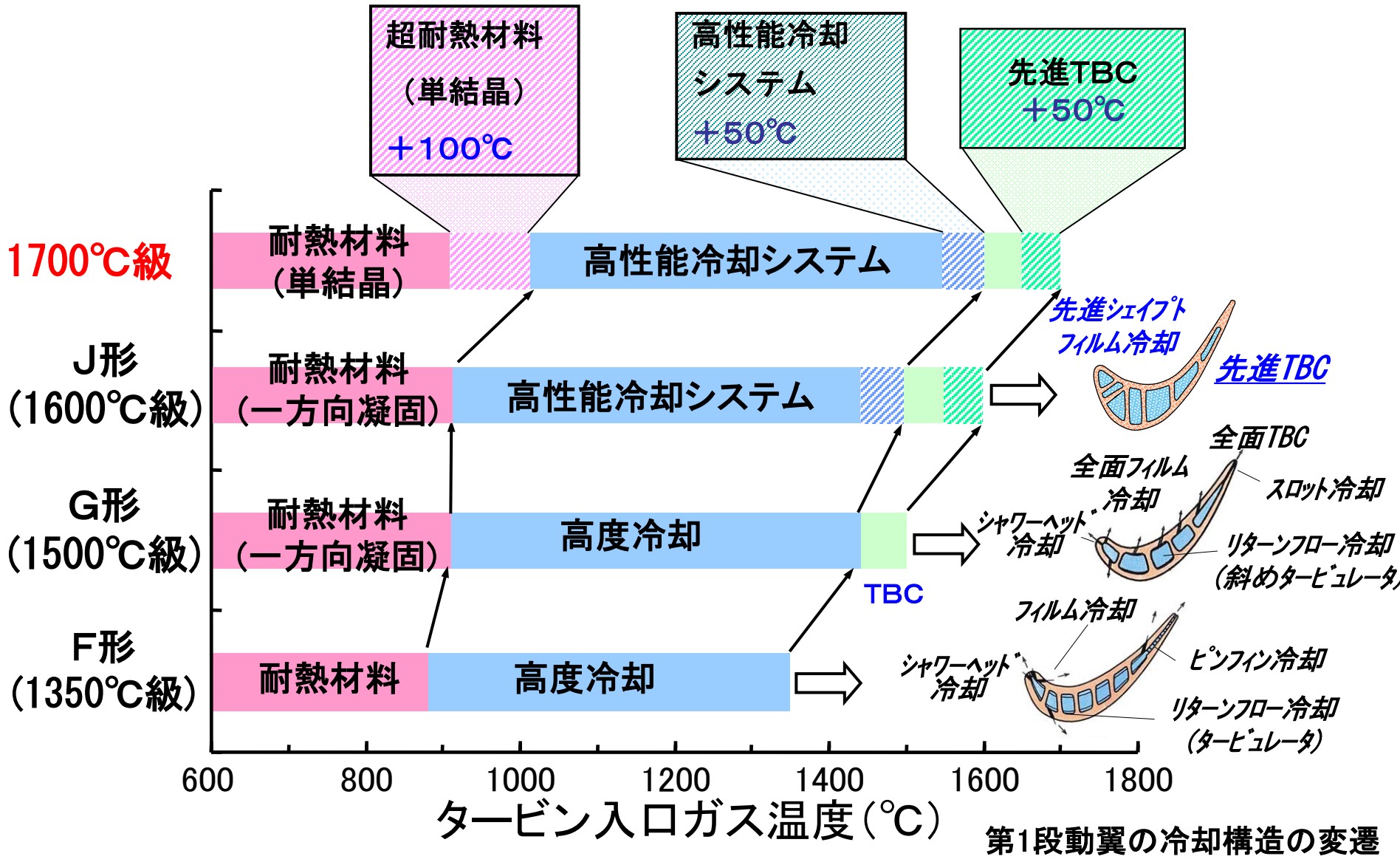


試作合金(1次)
試作合金(2次)
試作合金(3次)
試作合金(4次)

・クリープ，疲労強度を両立し目標満足
・第2世代単結晶合金と同等コスト



参考：1700℃達成のための要素技術の役割



第1段動翼の冷却構造の変遷

5. 事業化、波及効果

（事業化）

本技術開発により、世界最高効率の1700℃級ガスタービン技術確立の目処を得た。

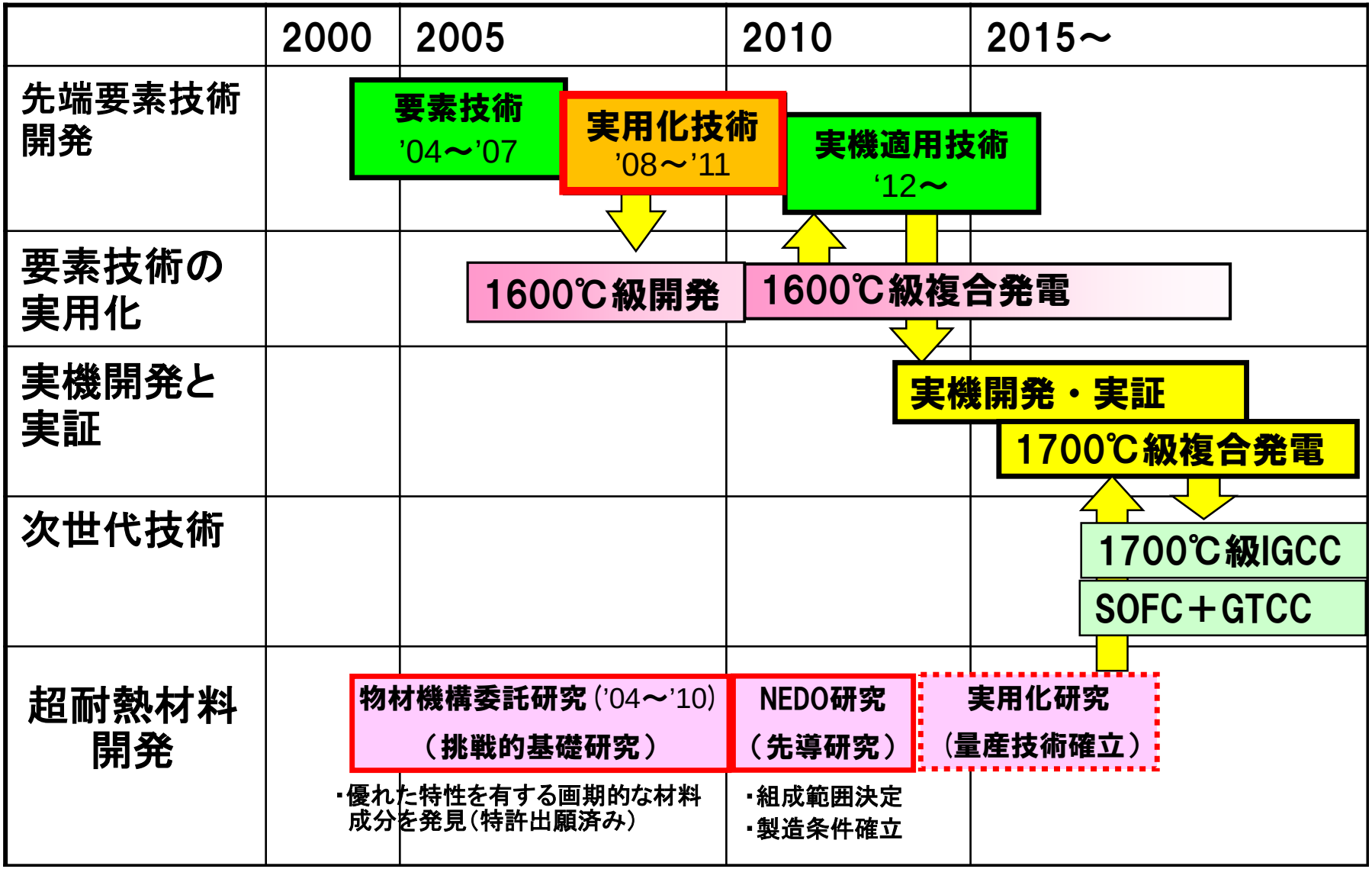
しかし、1500℃級から1700℃級に、一足飛びに200℃高温化することは大きなリスクを伴うことも事実である。そこで、1700℃級ガスタービンの実現の足掛かりとするために、本プロジェクトと並行して、1600℃級ガスタービンの開発を実施した。

これにより、我国のコンバインド発電技術の優位性を保つことが出来る。また、1500℃級をはじめとする既存のガスタービンへの技術的適用も進められており、大型の発電用ガスタービン全体の競争力強化の点で波及効果は大きい。

（波及効果）

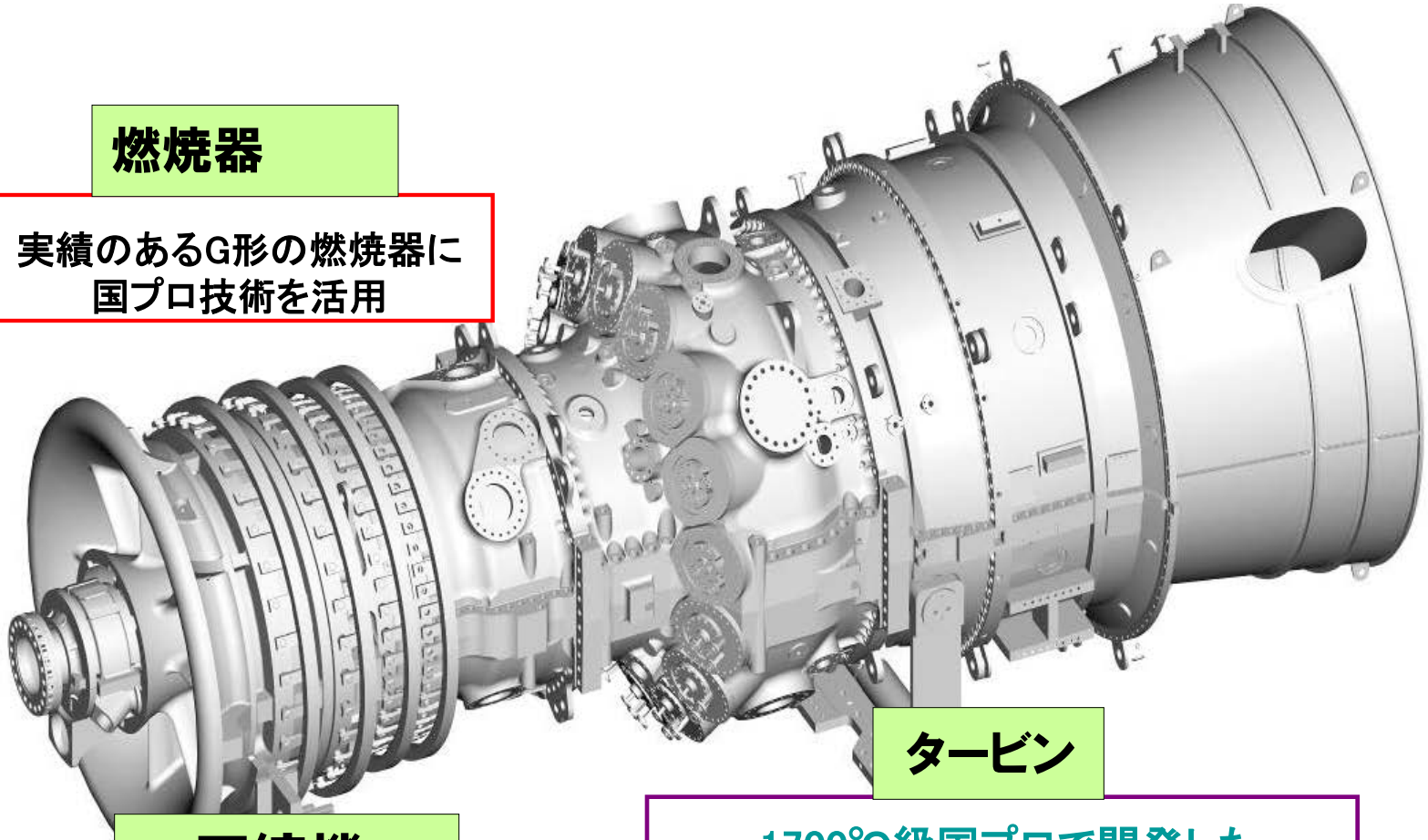
高効率高温ガスタービンは、石炭ガス化発電IGCCの主機の一つとして、適用可能である。1700℃級のIGCCが実現すれば、燃料の多様化によるエネルギーセキュリティー上のメリットに加え、発生CO2量の大幅な削減が期待できる。

実用化までの技術開発ロードマップ（1,700℃級ガスタービン）



世界初の1600℃級J形ガスタービンの開発

国プロの最新技術により、開発が可能となりました。



燃焼器

実績のあるG形の燃焼器に
国プロ技術を活用

タービン

1700℃級国プロで開発した
最新技術を適用

圧縮機

実証済みの圧縮機に
国プロ技術を活用

国プロ技術の実用化

1,600℃級ガスタービンを用いた高効率コンバインドサイクル

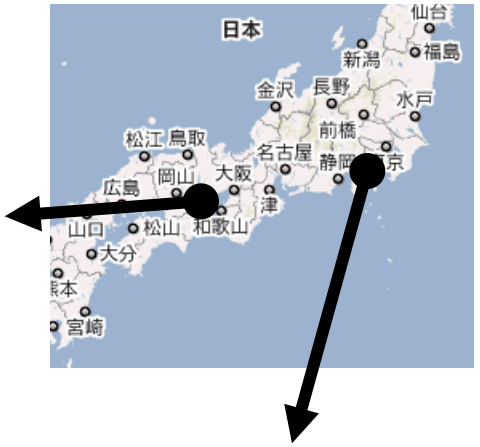
1,600℃級ガスタービンを用いた高効率コンバインドサイクル発電設備の
1号機が8月27日に運開しました。

関西電力殿　姫路第二発電所（2013年運用開始、292万KW、M501J×6台）

公開された環境アセス資料より抜粋

●最新鋭の1，600℃級ガスタービンを採用した世界最高水準の高効率コンバインドサイクル発電方式に設備更新することで、発電端熱効率（低位発熱量基準※）が約42%から約60%に向上します。

●発電電力量あたりの燃料費とCO2排出量を共に約30%低減することができます。



項　目	現　状	設備更新後
発電方式	汽力発電方式	コンバインドサイクル発電方式
発電所出力	２５５．０万ｋＷ （２５．０万ｋＷ×１基、 ３２．５万ｋＷ×２基、 ４５．０万ｋＷ×１基、 ６０．０万ｋＷ×２基）	２９１．９万ｋＷ（大気温度４℃） （４８．６５万ｋＷ×６基）
使用燃料	天然ガス	天然ガス
発電端熱効率 （低位発熱量基準）	約４２％	約６０％

東京電力殿
川崎発電所
（2016年度、142万KW、2台）

公開された環境アセス資料より抜粋。

費用対効果・変化への対応等

（CO2削減効果と省エネ効果）

既存の老朽火力発電所の約50%を1700℃級ガスタービンコンバインドサイクルに置き換えた場合のCO2低減効果は6700万ton/年（日本全体のCO2排出量の約5%に相当）、省エネ効果は原油換算で2200万トンと莫大な量と成る。

（国内リプレース需要への対応）

先進国では老朽火力のリプレース需要が急速に高まりつつあり、経済性が重要視されるため、発電効率の高い最新鋭のガスタービンを用いたコンバインド発電が選択される場合が多い。このようなニーズにいち早く応える必要があるが、本事業で開発した革新的な要素技術を活用することにより、世界初の1600℃級J形ガスタービンの開発が可能となった。

（急速な円高の影響と対応）

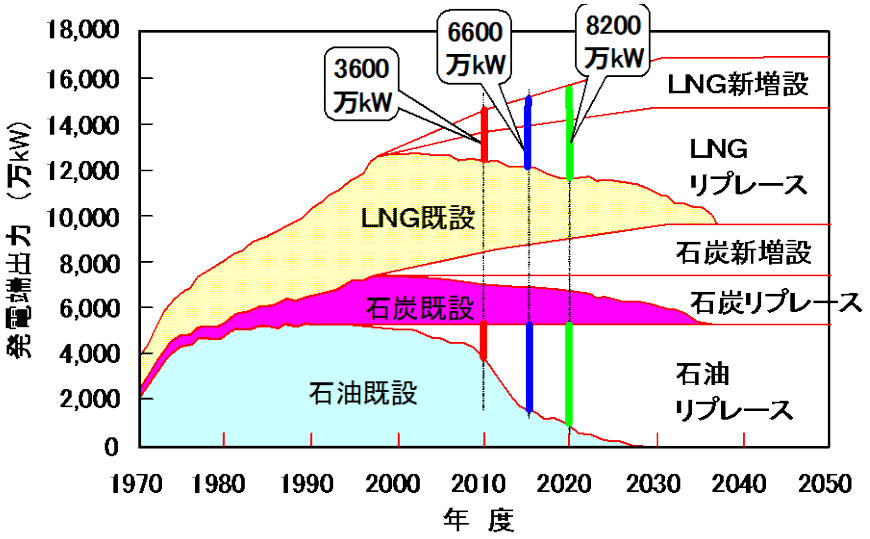
我が国は、徐々に大型ガスタービンのシェアを伸ばしてきたが、2009年以降は、リーマンショックの急速な円高のため世界市場で苦戦を強いられた。しかし、国プロ技術を適用した1600℃級J形ガスタービンの市場投入（国内電力向け）により2010年以降は日本のシェアが躍進した。

国プロにより、革新的な技術を開発・実用化することにより、国内の電力設備市場が活性化され、円高で苦しんでいる国内工場の生産量確保に繋がった。

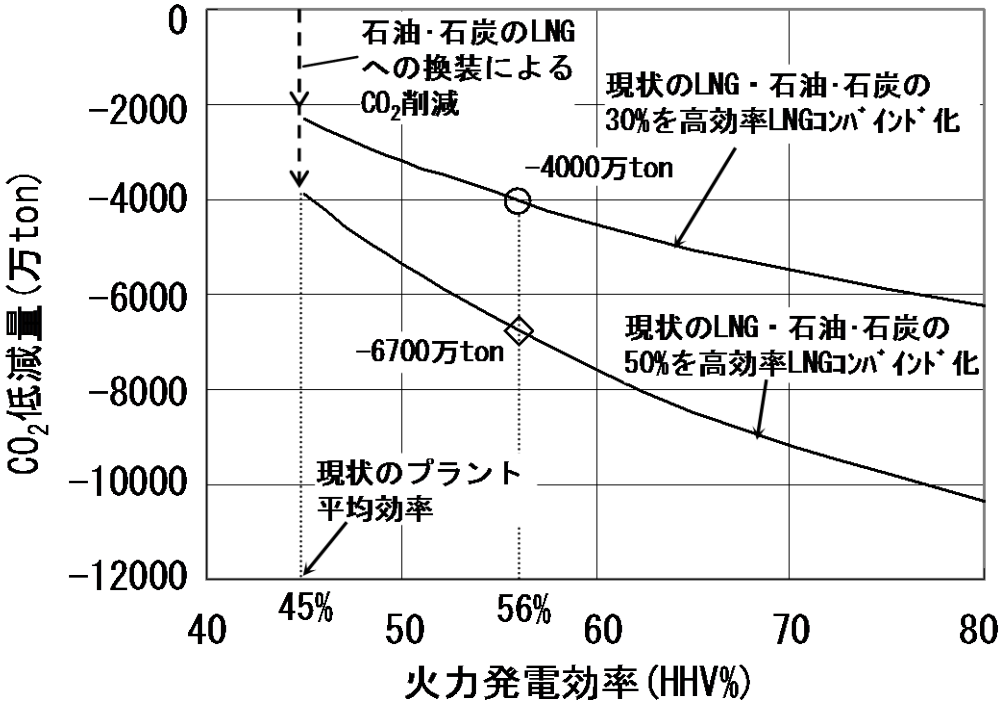
既存の火力発電所を1700℃級ガスタービンコンバインドサイクルに置き換えた場合のCO_2低減および省エネ効果

現状のLNG(平均発電効率45%)，石油および石炭火力を置き換えた場合の効果

置きかえる既存発電所の割合	CO_2削減量	全発電所からの排出量に占める割合	省エネルギー効果（原油換算）
30%	4000万ton/年	10%	1300万トン
50%	**6700万ton/年**	**17%**	**2200万トン**



わが国における電源構成の推移（プラント寿命40年）
出典：電力中央研究所



1700℃級ガスタービンCO_2低減効果

将来の展開

次世代発電技術の基盤を担う共通技術

1700℃級ガスタービンは、次世代発電の基盤を担う共通キー技術。

- **エネルギーの安定供給**
  燃料多様化---LNG、石炭IGCC、水素（原子力夜間電力で製造）のいずれにも適用可能
- **環境にやさしい**
  火力発電システムの中で最も安価にCO2回収が可能
- **卓越した経済性**
- **負荷調整能力**

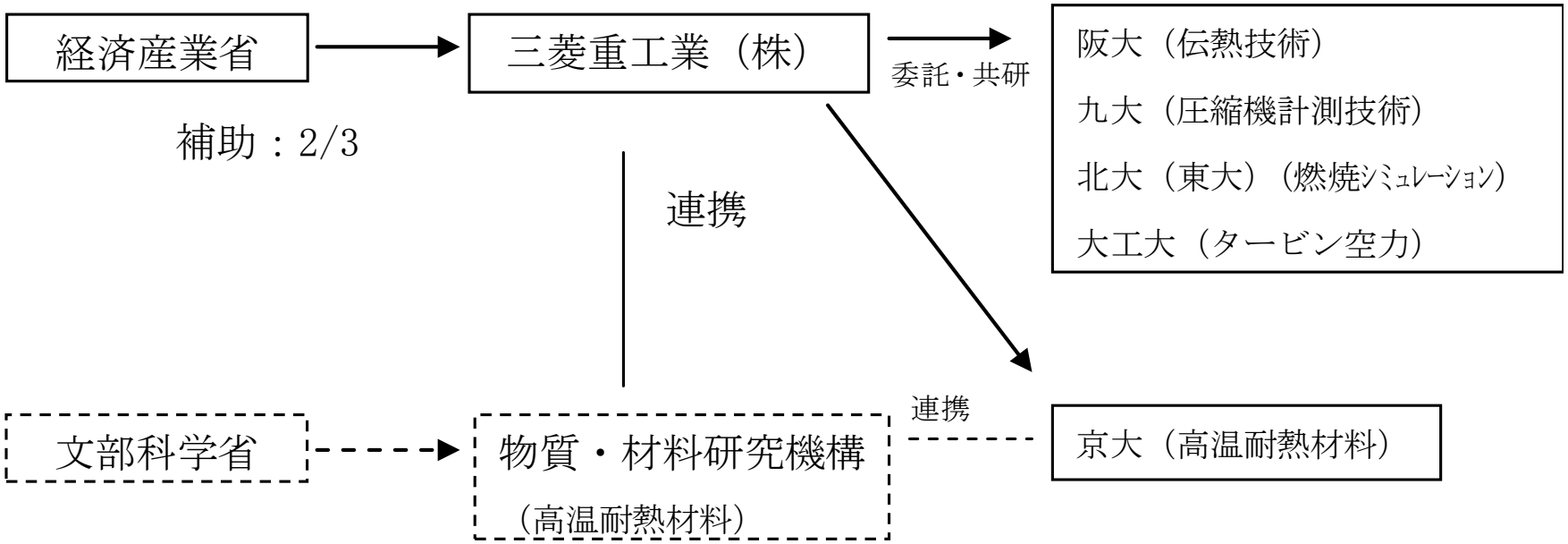
1700℃級ガスタービン

- **●LNG**
  超高効率57%複合発電
  排ガス再循CO2回収システム
- **●石炭**
  次世代高効率IGCC
- **●水素ガスタービン**
  原子力夜間電力による水素製造

6. 研究開発マネジメント体制

産官学連携・省庁間連携の体制を組んで推進した。

○　プロジェクトリーダー：　三菱重工業（株）　伊藤栄作



7．中間評価の結果

【各委員の提言】

本プロジェクトは1700℃級ガスタービンの実証機設計のための要素開発であり、今後計画されている圧縮機モジュール試験、高温高圧翼列試験、高圧燃焼試験はできる限り時間をかけて実施し、信頼性を確認していただきたい。

⇒　圧縮機モジュール試験は、各年度でそれぞれ実施してデータを蓄積し、信頼性を確認してまいりました。

一方、高温高圧翼列試験および高圧燃焼試験においては、高圧燃焼試験装置の製作に期間を要することから、最終年度（H23年度）に実施しましたが、その途中段階での試験と最終年度の高温・高圧試験の両データにより、信頼性の高さを確認してまいりました。

（参考）特許・論文等件数

論文数	投稿	発表	特許等件数（出願含）	電力会社の視察回数
５	１０	４２	３７	２１０

非常に多くの電力会社様にご視察していただきました。

高効率ガスタービン実用化技術開発（AHAT）の概要について

平成25年11月13日

日立製作所株式会社
住友精密工業株式会社
(財)電力中央研究所

目　次

１．プロジェクトの概要

２．目的・政策的位置付け

３．目標

４．成果、目標の達成度

５．事業化、波及効果

６．研究開発マネジメント・体制等

７．事前［中間］評価結果

1．プロジェクトの概要

概　　要	小中容量機（10万kW程度）の高効率化（45%→51%）のために有望とされている高湿分空気利用ガスタービン（AHAT）の実用化に必要な多段軸流圧縮機、多缶燃焼器等の開発を行うとともにシステムの信頼性等の検証を実施する。
実施期間	平成20年度～平成23年度（4年間）
予算総額	４８億円（補助（補助率：２／３）） 年度：H20 / H21 / H22 / H23 億円：2.2 / 10.9 / 24.7 / 10.3
実 施 者	（株）日立製作所、（一財）電力中央研究所、住友精密工業（株）
プロジェクトリーダー	㈱日立製作所　日立研究所　ターボ機械研究部　部長　圓島信也

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け

目的

天然ガスは、世界各国に幅広く分布しており、中東依存度は約2割と低いためエネルギーセキュリティを確保する上で極めて重要な燃料である。また、他の化石燃料に比べ、環境負荷が少ないクリーンなエネルギーである。

そのため、天然ガスの利用拡大を図るべく、さらなる二酸化炭素排出量の削減が見込まれる高効率ガスタービンの技術開発を推進していくことが強く求められている。

高湿分空気利用ガスタービン（AHAT*1）は、中小容量機（10万kW程度）の高効率化（45%(HHV)既設複圧CC*2→51%(HHV)以上）を目的に、日本オリジナルの技術であり、世界初となるAHATの実用化に必要な技術開発を行う。

＊1：AHAT：Advanced Humid Air Turbine

＊2：CC：Combined Cycle

国のエネルギー技術開発戦略における高効率ガスタービンの位置づけ

高効率ガスタービンは、二酸化炭素排出量を抑制できる高効率天然ガス発電であり、「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」において、「重点的に取り組むべきエネルギー革新技術」の一つとして位置付けられている。

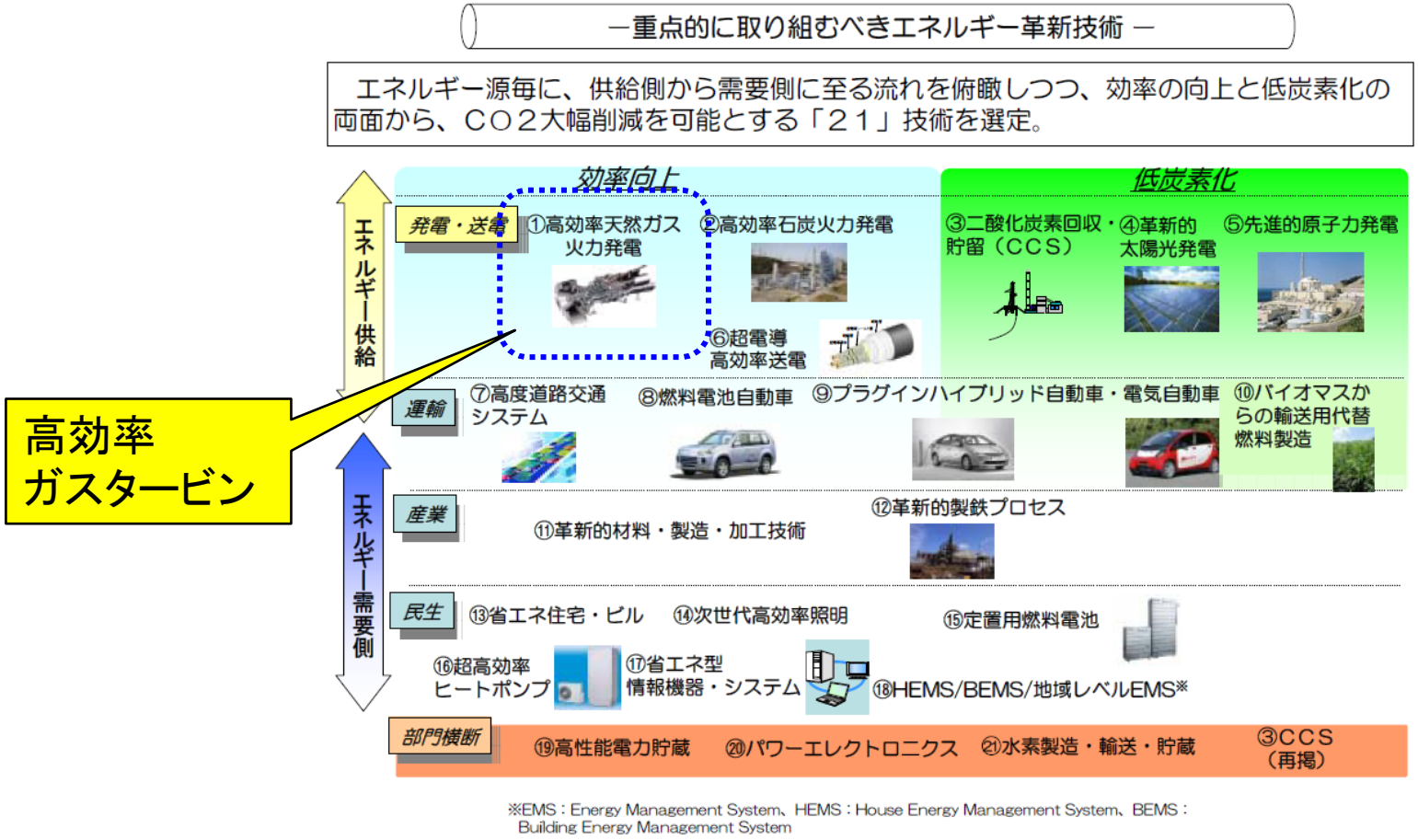


図　「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」(平成20年3月、経産省)における高効率天然ガス火力発電の位置づけ

国のエネルギー技術開発戦略におけるAHATの位置づけ

AHAT(高湿分空気利用ガスタービン)は、「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」の高効率天然ガス火力発電のロードマップにおいて、2020年代に実用化を目指す技術として位置付けられている。

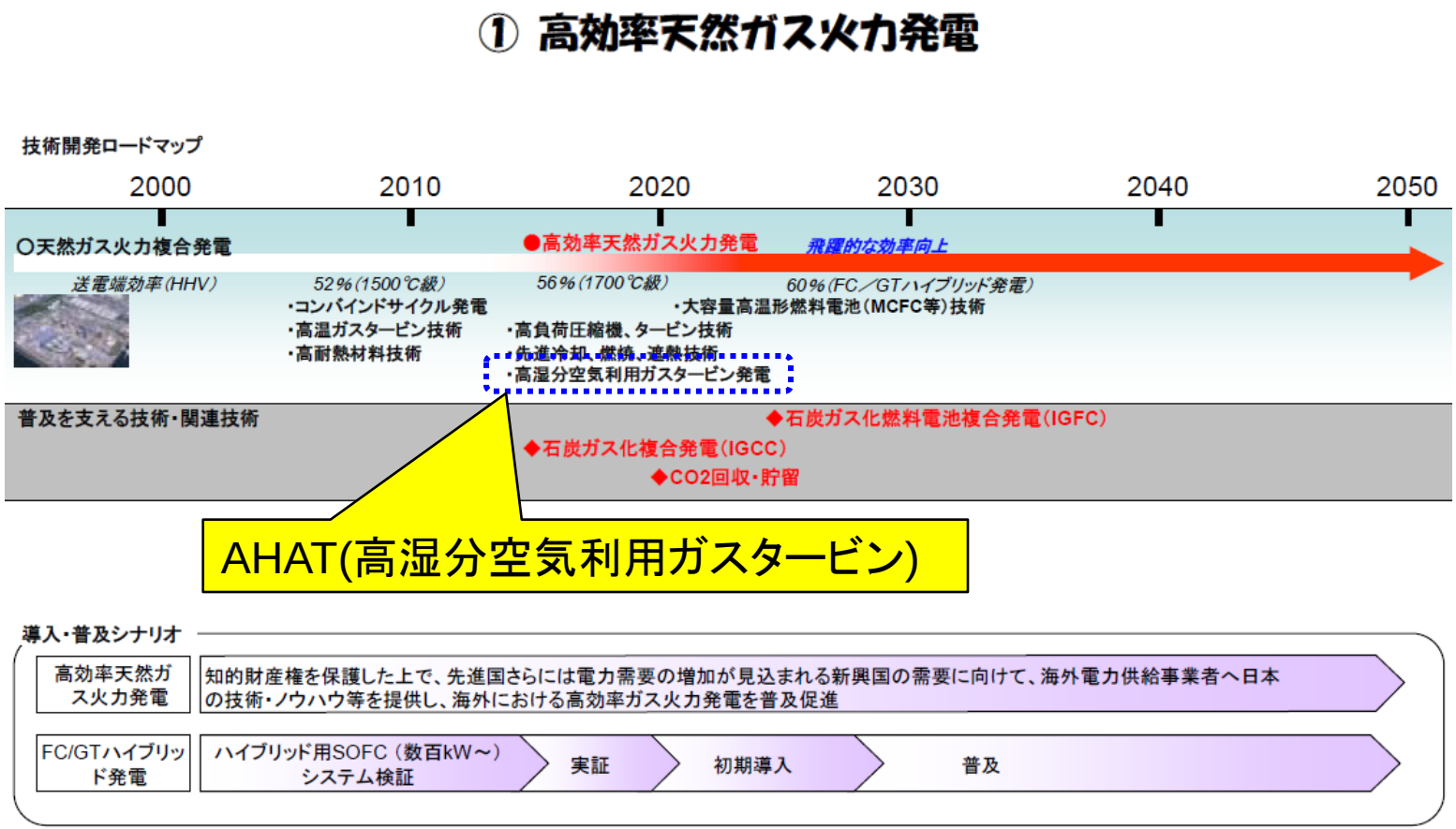
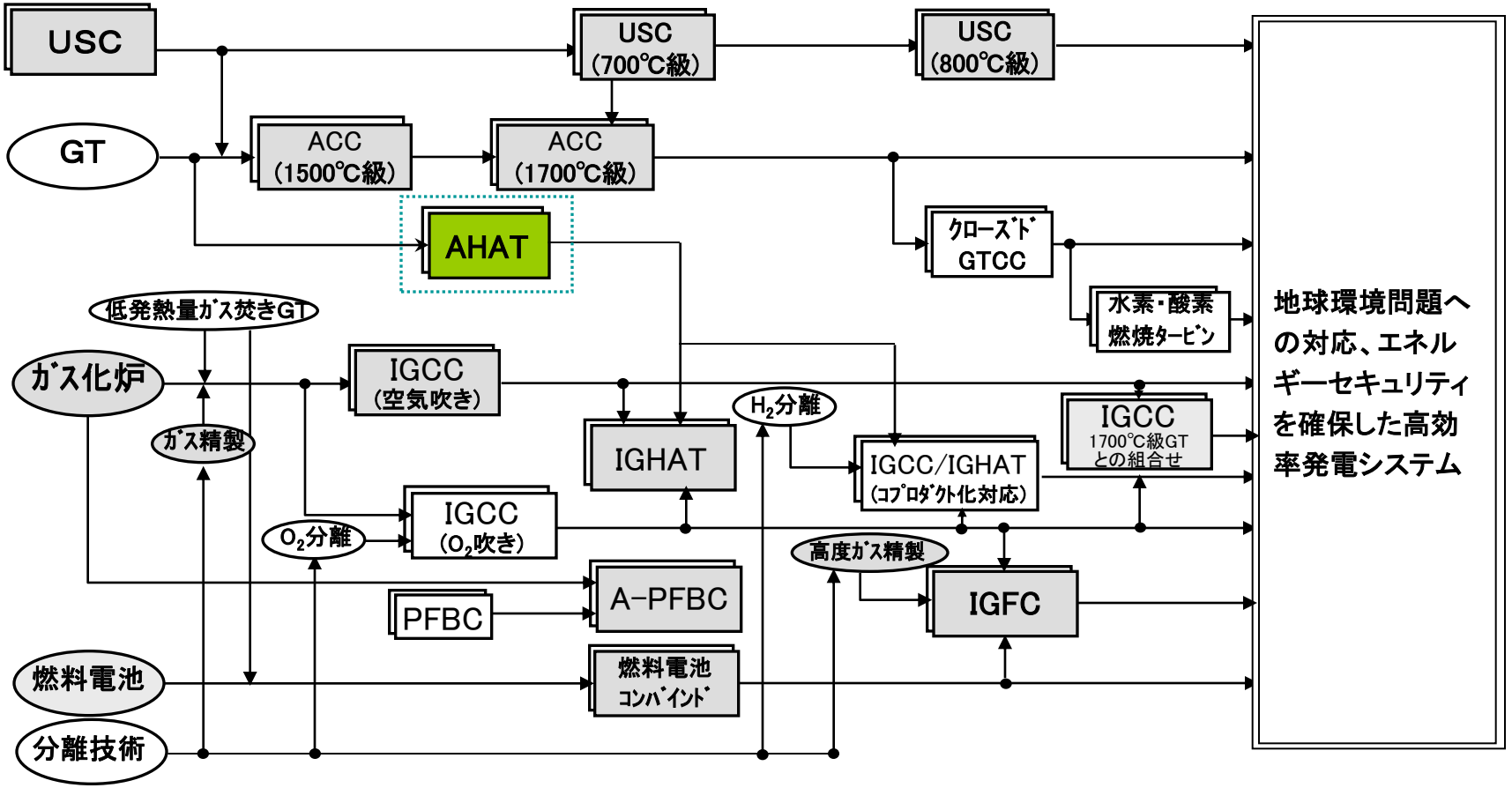


図　「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」(平成20年3月、経産省)におけるロードマップ

他の発電システムとAHATの位置づけ

AHATはガスタービンサイクルを改良したシステムであり、比較的早期に実用化が期待できる高効率発電システムである。また、次世代高効率発電システムである石炭ガス化と組み合わせたIGHATへ展開できる技術である。



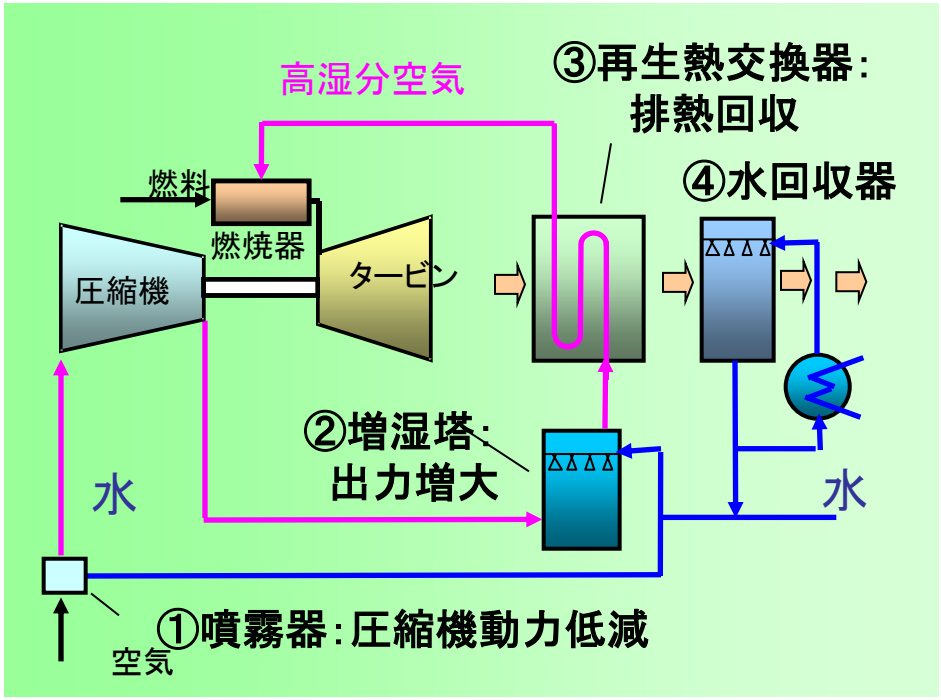
：発電システム　：要素技術　網掛：調査対象技術　：目的

出典：「電力分野産業技術戦略」に関わる動向調査報告書　平成16年6月　（財）エネ総工研

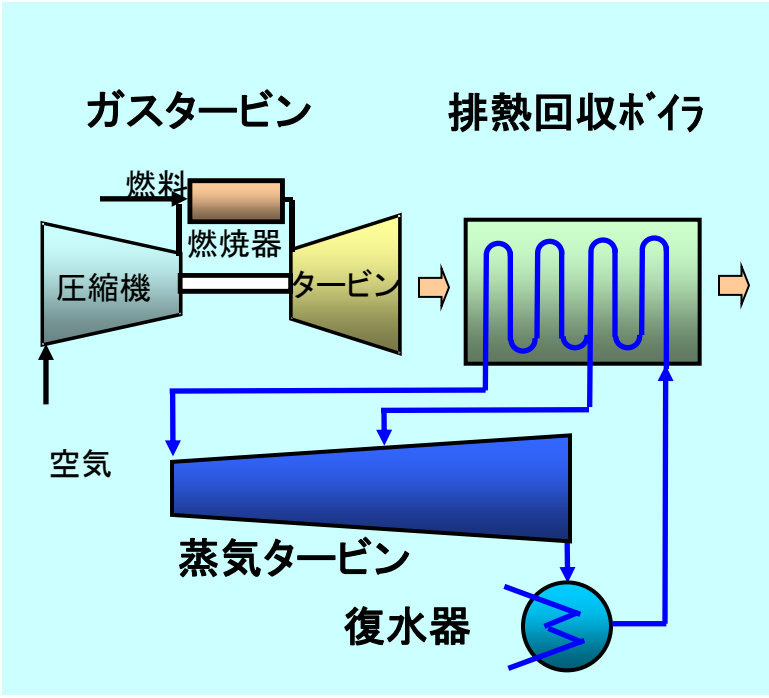
3. 目標

AHATとは（1）

日本オリジナルの技術であり、高湿分空気を利用したガスタービン単独の発電システムである。コンバインドサイクルの蒸気タービン蒸気量に匹敵する湿分を増湿塔で加え、ガスタービン排熱を高湿分再生熱交換器で回収し、ガスタービンで利用する。



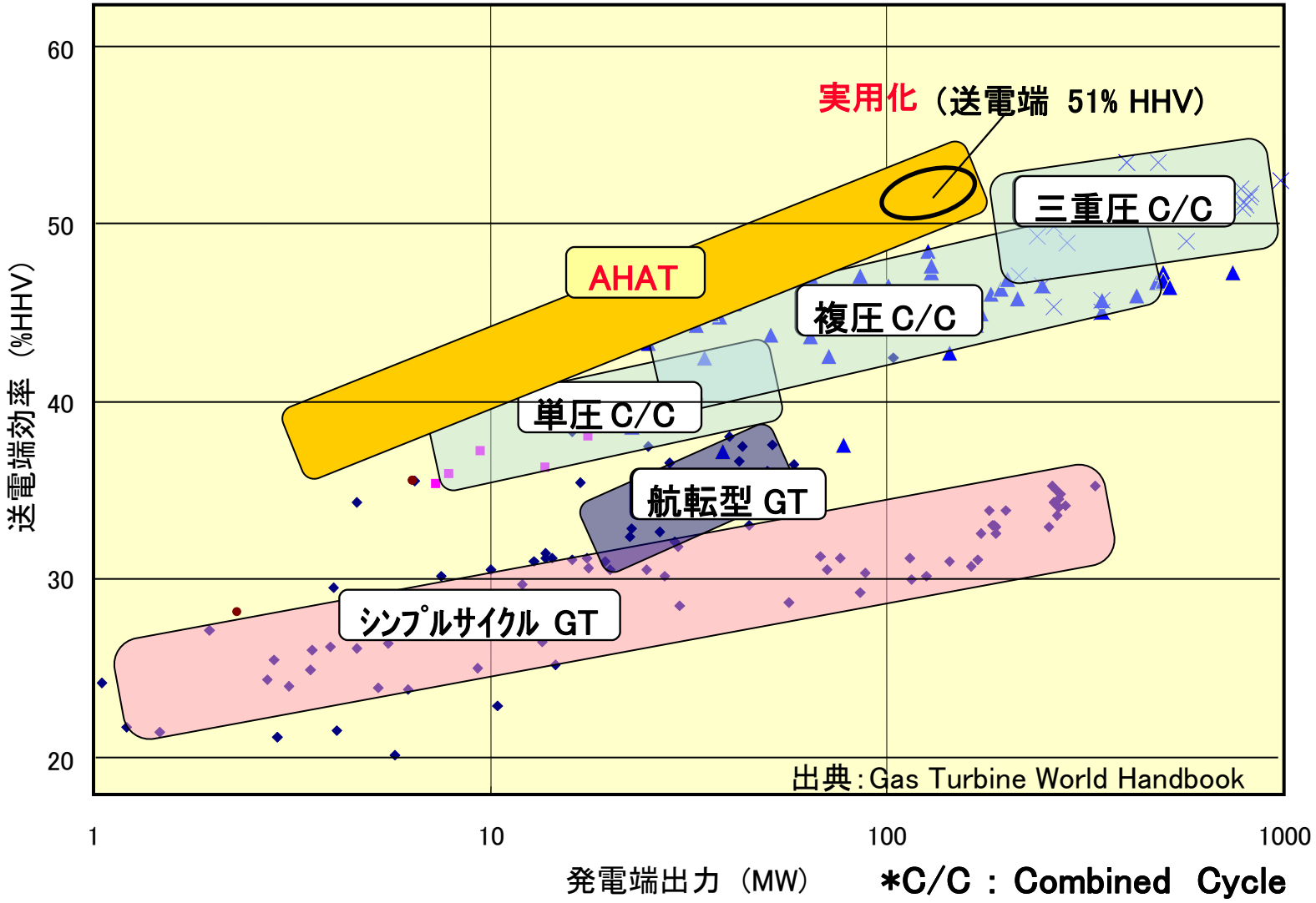
AHAT



コンバインドサイクル

AHATとは(2)

中小容量機(10万kW程度)で、コンバインドサイクルの効率を凌ぐ新型ガスタービン発電システムである。



3．目標

AHATとは（3）

AHATは、運用性、環境性、経済性に優れた発電システムである。

◎：特に優位　○：優位　－：同等

項目		AHAT		コンバインドサイクル
運用性	起動時間	◎	ST系なく、起動時間短い	ST　HRSG暖機要
	負荷即応性	◎	GT単独運転並み	ベース
	最低負荷	◎	高湿分燃焼により低負荷で運転可能	低 NO x安定燃焼の制限
	大気温度特性	○	吸気噴霧冷却：高気温時の出力低下小	GTおよびST出力低下
	制御	○	GT 制御が主でシンプル	GT 、ST 制御あり
環境性	NO x対策	○	GT：高湿分空気燃焼、GT排気：必要に応じ脱硝装置	GT：低NOx燃焼器、又は、水噴射、又は蒸気噴射、GT排気：脱硝装置
	立地制約	◎	水回収水温60℃程度：冷却塔冷却 内陸部にも設置可能	ST出口温30℃程度：復水器冷却 沿岸（海水への温排水）
経済性	機器構成、工期	◎	ST系なく、構成シンプルで工期も短い	ベース
	配管	－	GT 圧縮機吐出圧力低く、薄肉 ただし、再生サイクル配管径大	HRSG 高圧系圧力高く、肉厚 ただし、主蒸気配管径小
	水質管理	－	水処理装置（イオン交換樹脂等）設置	薬注による　pH 調整
	ユーティリティ消費	－	純水(圧縮機吸気噴霧冷却用),ｱﾝﾓﾆｱ(脱消用)、冷却水(冷却塔補給用)	純水(HRSGﾌﾞﾛｰ補給用)、ｱﾝﾓﾆｱ(脱消用)、冷却水(補給用)
	メンテナンス費用	○	構成機器少ない（排熱回収系、水回収系）	排熱回収系、ST系、復水器系

GT：ガスタービン、ST：蒸気タービン、HRSG：排熱回収ボイラ

AHATの研究課題

本事業におけるAHATの研究課題は以下の3点である。

1）①～⑤：高湿分空気に関係した実用化技術

2）⑥：実用化技術（①～④）を組合せた総合試験装置による機器の相互作用確認

3）⑦：ユーザー視点に立ったシステム評価

③-2高湿分燃焼器
- 圧縮機から全量抽気し燃焼器へ導入
- 多缶燃焼器に対する低圧損構造

③-1高湿分燃焼器
- 構造変更（単缶→多缶）
- 更なる低NOx化

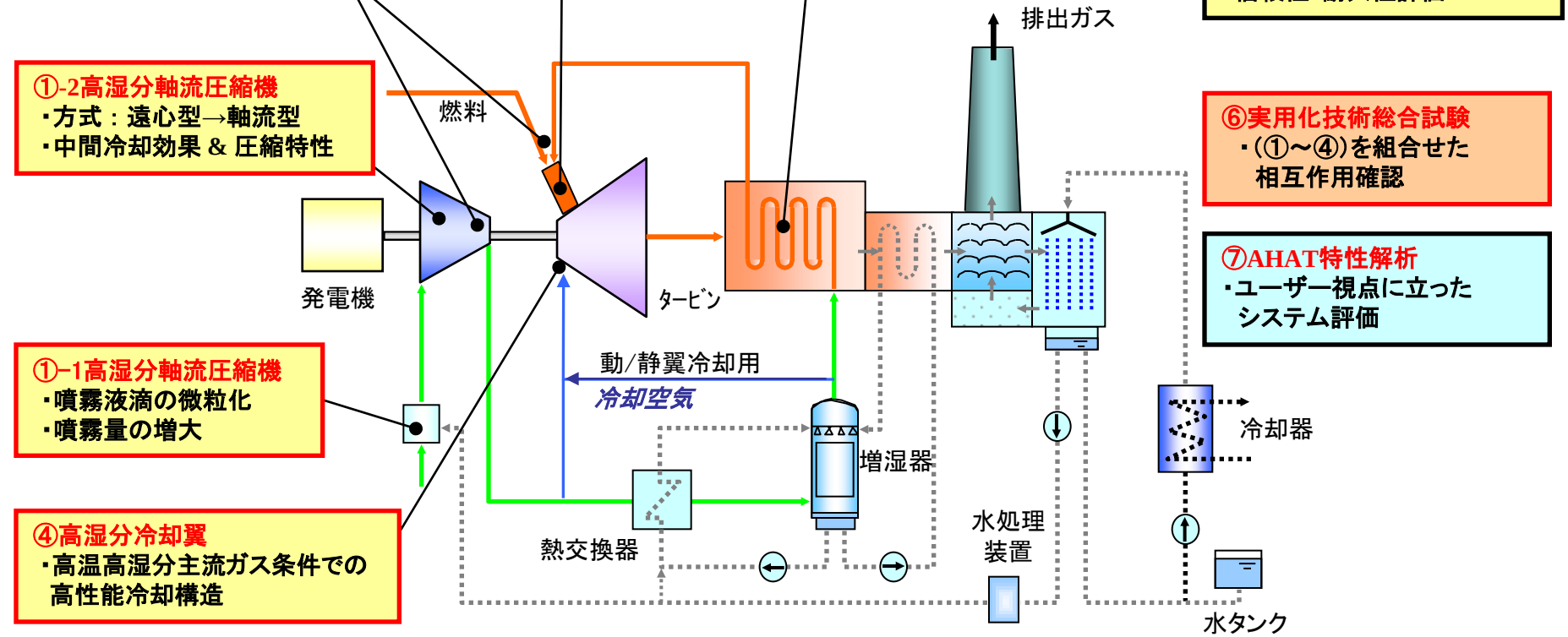
②高湿分再生熱交換器
- 高温・高圧・高湿分対応の高効率熱交換器
- 伝熱ｺｱの大型化
- 構造最適化（圧損低減/偏流防止）

⑤3MW級検証機
- 様々な運転条件による性能検証
- 水回収技術
- 信頼性・耐久性評価

①-2高湿分軸流圧縮機
- 方式：遠心型→軸流型
- 中間冷却効果 & 圧縮特性

⑥実用化技術総合試験
- （①～④）を組合せた相互作用確認

⑦AHAT特性解析
- ユーザー視点に立ったシステム評価



①-1高湿分軸流圧縮機
- 噴霧液滴の微粒化
- 噴霧量の増大

④高湿分冷却翼
- 高温高湿分主流ガス条件での高性能冷却構造

3．目標

AHATの開発目標

下表の要素技術項目は、天然ガスを燃料とした10万kW級中容量高湿分空気利用ガスタービンシステムにおいて、送電端効率51%、NOx排出濃度10ppm以下（16%O2）を達成可能にする。

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
①高湿分 軸流圧縮機	・吸気噴霧量：3.5%以上	圧縮機内部での水滴蒸発効果を積極的に活用できる噴霧量を設定した。
②高湿分 再生熱交換器	・温度効率：90%以上 ・伝熱面密度：1000m2/m3以上	熱交換器のコアの大型化（コスト）と性能を勘案して設定した。温度効率90%は高温で作動する再生器にとって極めて高い値に相当する。
③高湿分 多缶燃焼器	・NOx：10ppm以下	高湿分空気による燃焼では燃焼の不安定化が懸念される、低NOxと燃焼安定性の両立を勘案し設定した。
④高湿分 冷却翼	・冷却効率　静翼：70%以上 動翼：60%以上	高湿分により主流ガス側の熱伝達率が大きくなり熱負荷が増大することを勘案し設定した。
⑤3MW級 検証機	・AHATプラント側の特性把握	3MW機試験を実施し、AHATシステム特性、機器性能の向上、主要機器の経時変化を確認する。
⑥実用化技術 総合試験	・発電用ヘビーデューティー ガスタービンにAHATを適用	開発した要素技術を組合せ、高圧、高湿分環境における高湿分軸流圧縮機、高湿分再生熱交換器、高湿分多缶燃焼器、高湿分冷却翼の相互作用を確認する。
⑦AHAT特性 解析	・ユーザ視点からの システム評価	技術開発においては、開発側のみならず、ユーザの視点に立って客観的に特性を評価することが重要。

4. 成果、目標の達成度

天然ガスを燃料とした10万kW級中容量高湿分空気利用ガスタービンシステムにおいて、送電端効率51%、NOx排出濃度10ppm以下（16%O2）を達成可能な見通しが得られた。

要素技術	目標・指標	成果	達成度
①高湿分 軸流圧縮機	・吸気噴霧量：3.5%以上	最大1.7%の噴霧試験によりアルゴリズムの妥当性を確認した。そのアルゴリズムを用いて3.5%噴霧時の信頼性を確認した。	達成
②高湿分 再生熱交換器	・温度効率：90%以上 ・伝熱面密度：1000m^2/m^3以上	高性能フィンの開発により伝熱面密度1160m^2/m^3を実現した。総合試験で温度効率91.3%、圧力損失は仕様値以内を達成した。	達成
③高湿分 多缶燃焼器	・NOx：10ppm以下	点火、昇速、加湿、吸気噴霧時の安定燃焼を確認した。湿分が飽和条件となるフルAHATシステムの条件で、NOx濃度10ppm以下の見通しを得た。	達成
④高湿分冷却翼	・冷却効率　静翼：70%以上 動翼：60%以上	高湿分低温空気を利用したハイブリッド冷却静翼を製作し、冷却効率70%以上を確認した。	達成
⑤3MW級検証機	・AHATプラント側の特性把握	システム特性、機器性能の向上、主要機器の経時変化ないことを確認した。	達成
⑥実用化技術 総合試験	・発電用ヘビーデューティー ガスタービンにAHATを適用	累計65時間運転し、吸気噴霧冷却、加湿管、再生熱交換器、高湿分冷却翼などの相互作用（性能）を確認、課題摘出した。	達成
⑦AHAT特性解析	・ユーザ視点からの システム評価	定格出力時の性能だけでなく、大気温度変化特性、部分負荷・起動特性を明らかにした。	達成

①高湿分軸流圧縮機

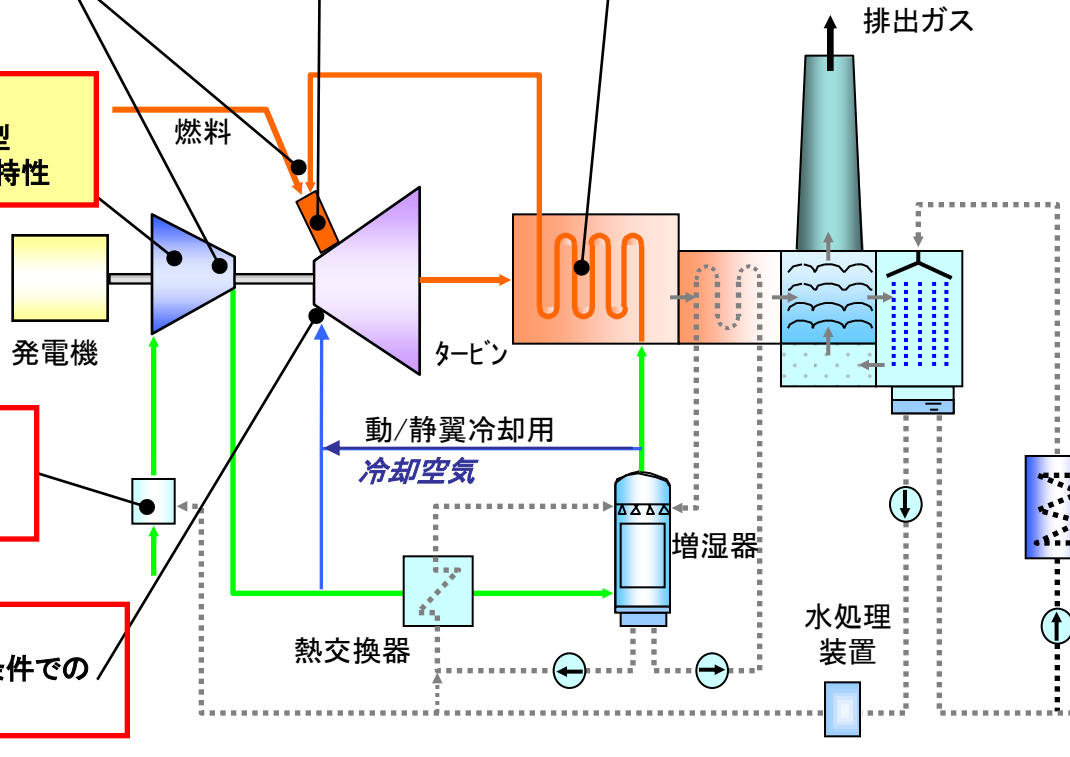
③−2高湿分燃焼器
・圧縮機から全量抽気し
燃焼器へ導入
・多缶燃焼器に対する低圧損構造

③-1高湿分燃焼器
・構造変更(単缶→多缶)
・更なる低NOx化

②高湿分再生熱交換器
・高温・高圧・高湿分対応の高効率
熱交換器
・伝熱ｺｱの大型化
・構造最適化(圧損低減/偏流防止)

⑤3MW級検証機
・様々な運転条件による
性能検証
・水回収技術
・信頼性・耐久性評価

①-2高湿分軸流圧縮機
・方式：遠心型→軸流型
・中間冷却効果 & 圧縮特性



⑥実用化技術総合試験
・(①～④)を組合せた
相互作用確認

⑦AHAT特性解析
・ユーザー視点に立った
システム評価

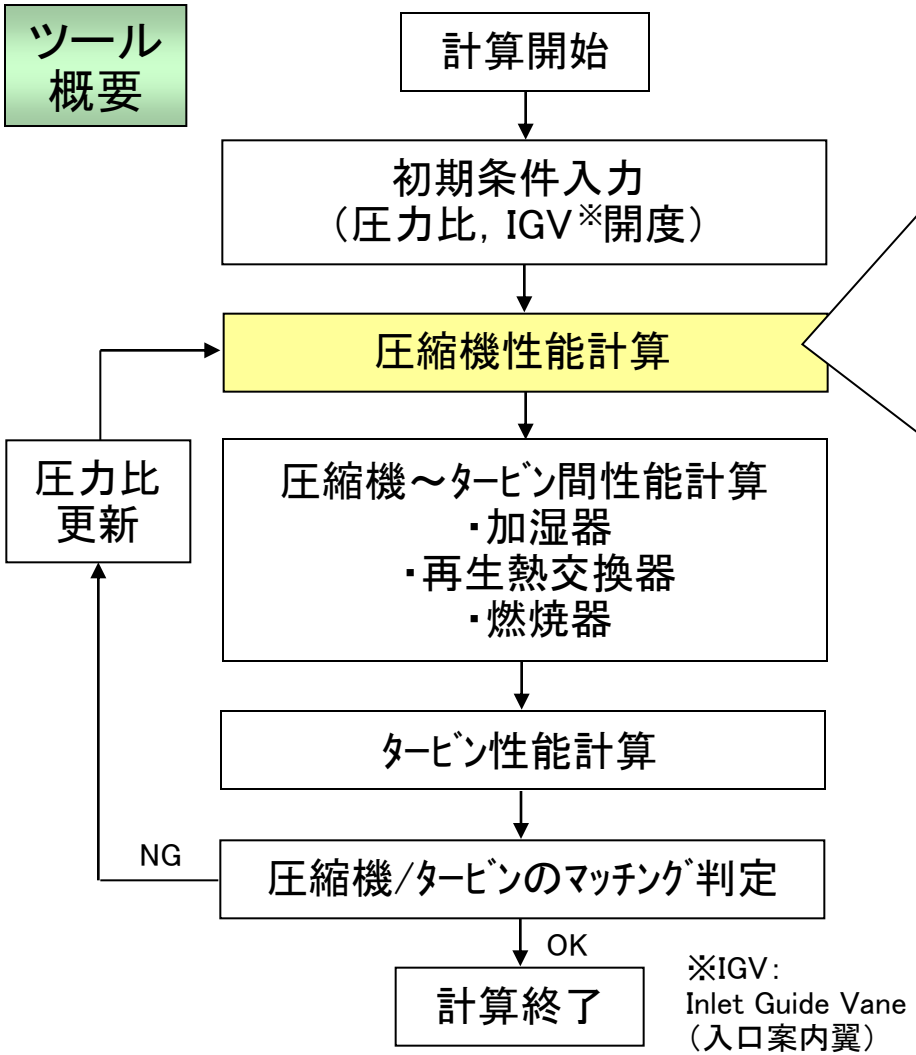
①−1高湿分軸流圧縮機
・噴霧液滴の微粒化
・噴霧量の増大

④高湿分冷却翼
・高温高湿分主流ガス条件での
高性能冷却構造

①高湿分軸流圧縮機：蒸発予測モデルの高度化

蒸発予測アルゴリズムを以下の(1)～(3)の項目について高度化、ガスタービン全体のヒートバランス設計ツールに実装し、圧縮機内部蒸発予測を可能にした

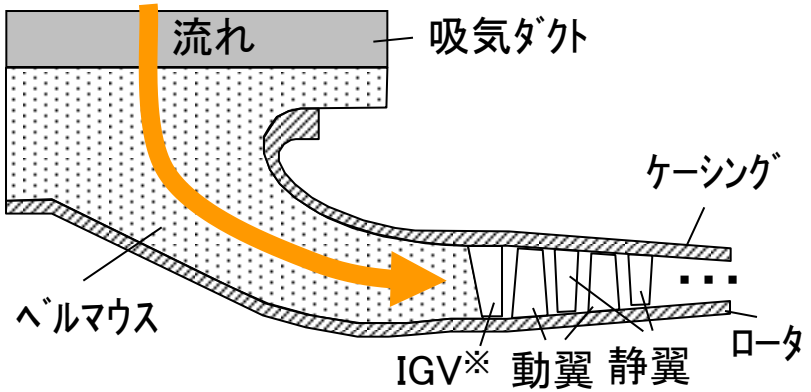
ツール概要



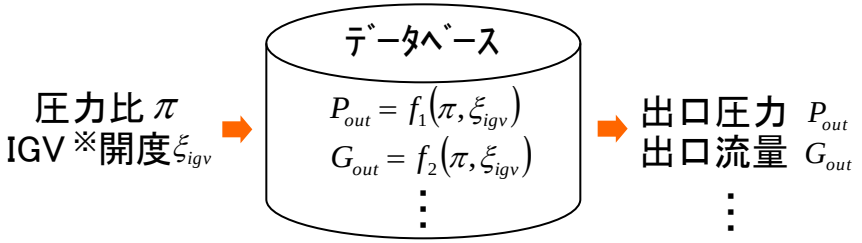
高度化した蒸発予測ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑを実装

特徴

(1) 吸気ﾀﾞｸﾄ蒸発による流量増加を考慮
(2) 翼面での液滴捕集を模擬
(3) 液滴径分布を考慮



実装時の計算時間短縮のため
圧縮機特性をﾃﾞｰﾀﾍﾞｰｽ化



①高湿分軸流圧縮機：吸気噴霧試験結果

吸気噴霧量が最大1.7%（吸込空気質量比)となる噴霧試験を実施し、噴霧による性能向上（流量、圧力比、圧縮動力）を確認した。また開発した蒸発予測アルゴリズムの妥当性も確認した。

表　試験結果まとめ

項目	単位	内容
噴霧量	wt%	1.7
吸気温度低下量	℃	1.6
出口温度低下量	℃	36.7
吸込流量（DRY比）	−	1.018
圧力比（DRY比）	−	1.011
単位流量当たりの圧縮動力（DRY比）	−	0.970

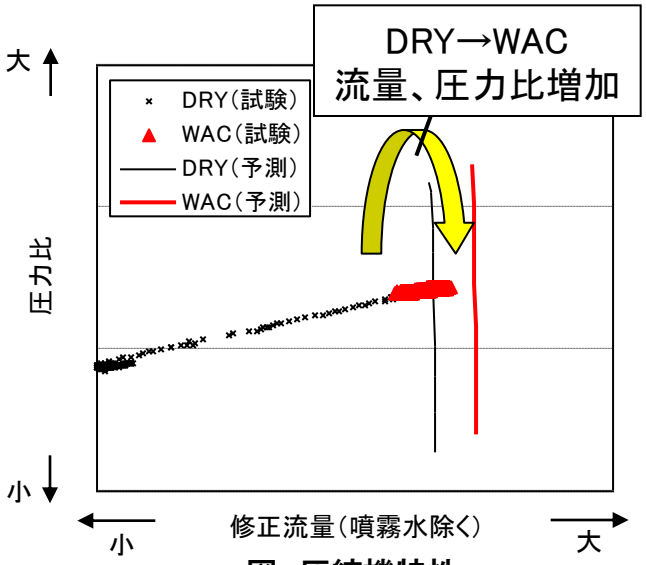


図　圧縮機特性

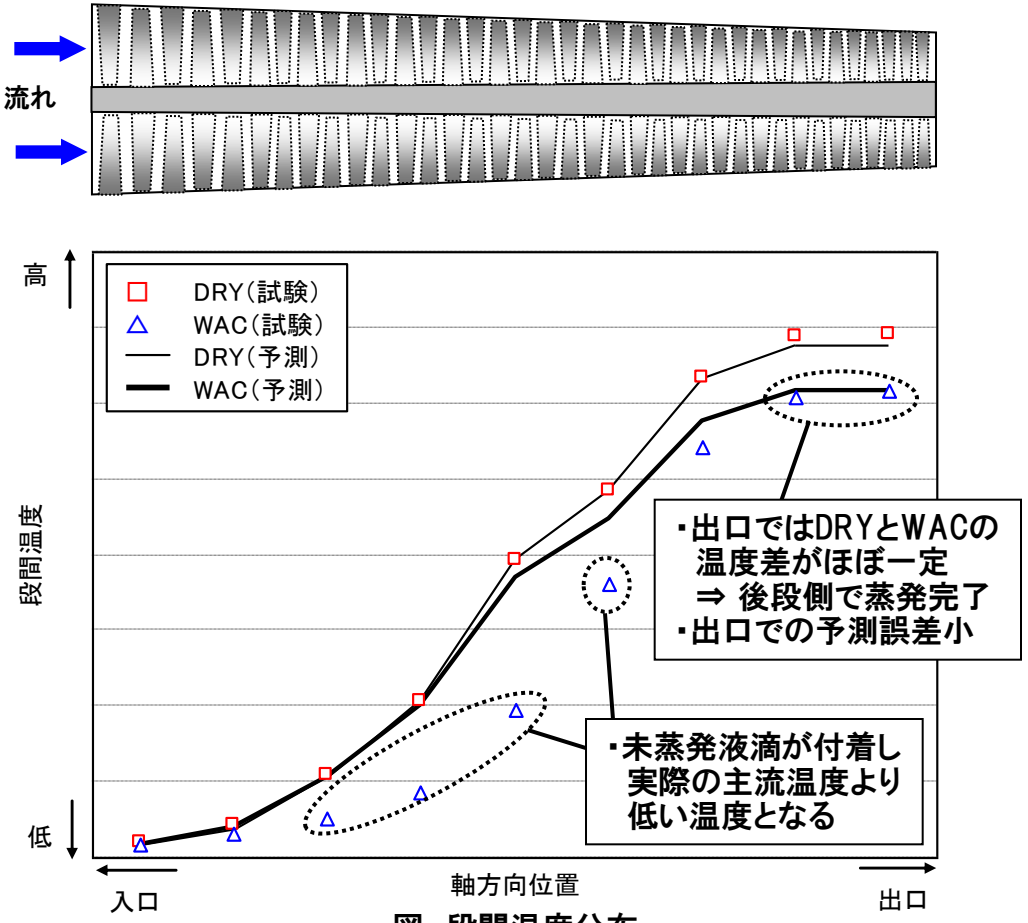


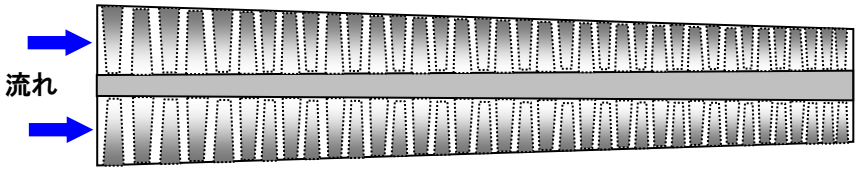
図　段間温度分布

①高湿分軸流圧縮機：3.5%噴霧時の性能予測

蒸発予測アルゴリズムにより、吸気噴霧量が3.5%（吸込空気質量比）となる場合の圧縮機性能を予測した。その結果噴霧時に全液滴が蒸発し、翼負荷が設計基準を満たすことが確認された。

表　検討条件

項目	単位	内容
大気温度	℃	15
相対湿度	RH%	60
吸気噴霧量	wt%	3.5



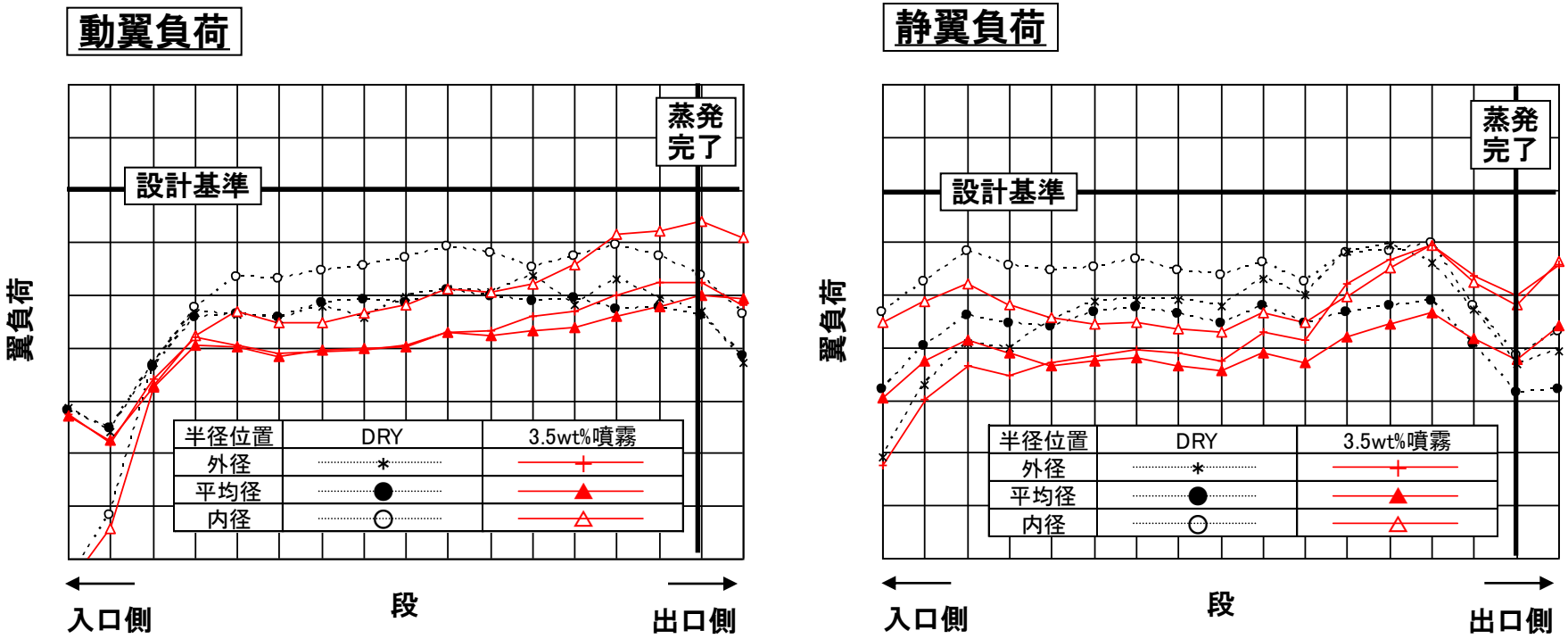


図　翼負荷分布

②高湿分再生熱交換器

③−2高湿分燃焼器
・圧縮機から全量抽気し燃焼器へ導入
・多缶燃焼器に対する低圧損構造

③-1高湿分燃焼器
・構造変更(単缶→多缶)
・更なる低NOx化

②高湿分再生熱交換器
・高温・高圧・高湿分対応の高効率熱交換器
・伝熱ｺｱの大型化
・構造最適化(圧損低減/偏流防止)

⑤3MW級検証機
・様々な運転条件による性能検証
・水回収技術
・信頼性・耐久性評価

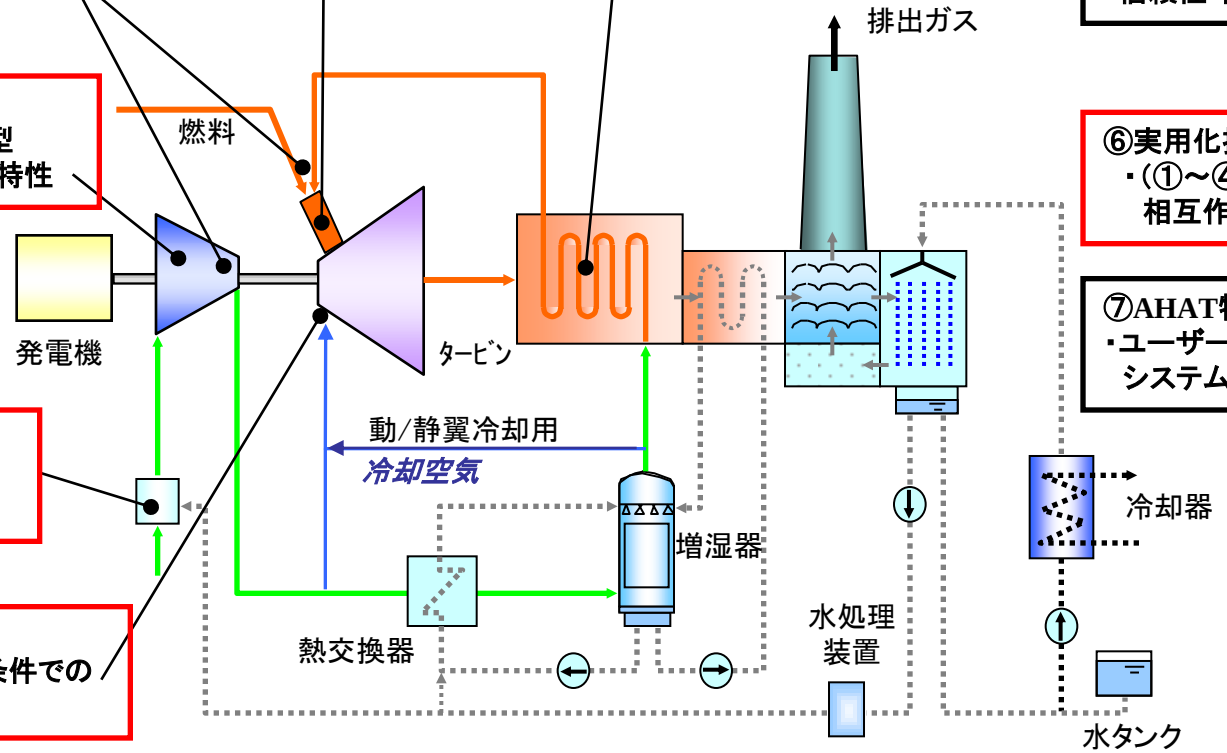
①-2高湿分軸流圧縮機
・方式：遠心型→軸流型
・中間冷却効果 & 圧縮特性

⑥実用化技術総合試験
・(①〜④)を組合せた相互作用確認

⑦AHAT特性解析
・ユーザー視点に立ったシステム評価

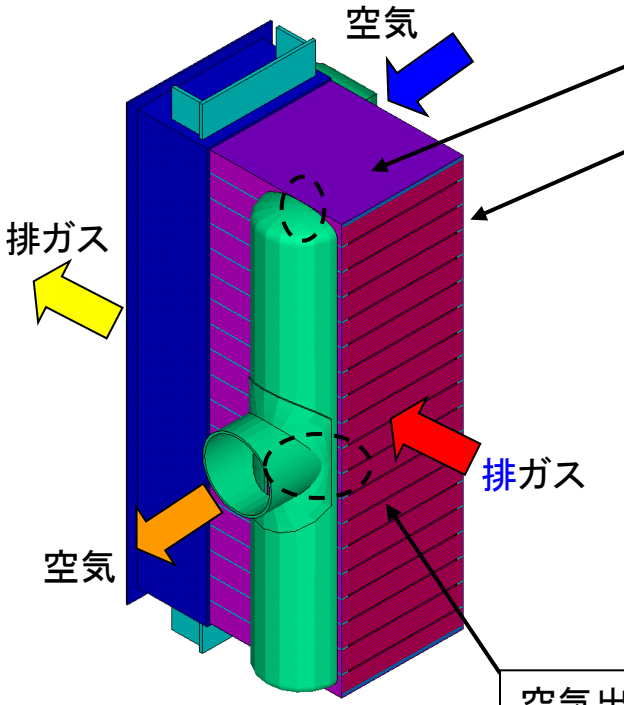
①−1高湿分軸流圧縮機
・噴霧液滴の微粒化
・噴霧量の増大

④高湿分冷却翼
・高温高湿分主流ガス条件での高性能冷却構造

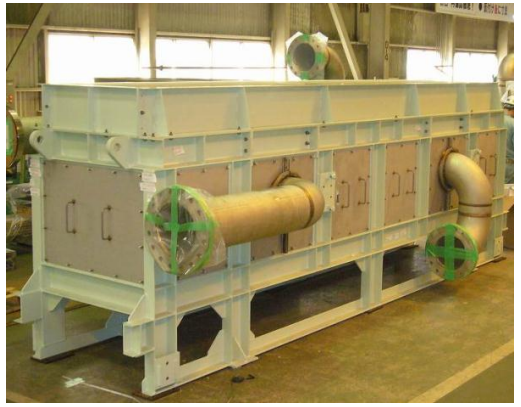


②高湿分再生熱交換器：材料選定、耐久性向上

●材料は、高性能かつ低コスト、耐水蒸気酸化性を考慮してステンレスを選定した。
●構造は、構造解析とスケールモデによる耐久試験により耐久性の向上を確認した。
●総合試験用の試験体として、モジュール構造を採用した再生熱交換器を製作した。



再生熱交換器本体



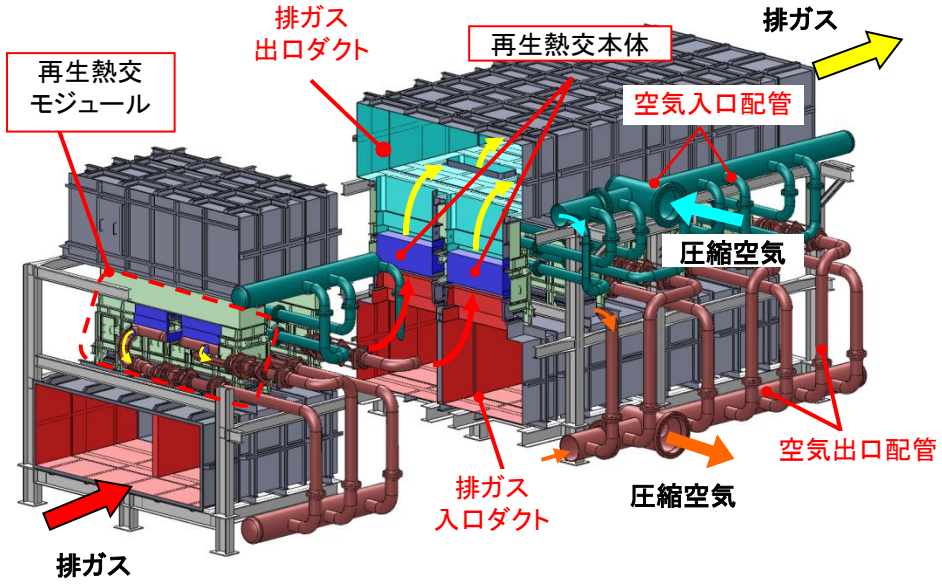
再生熱交換器モジュール

再生熱交換器本体の構造を見直して耐久性を向上

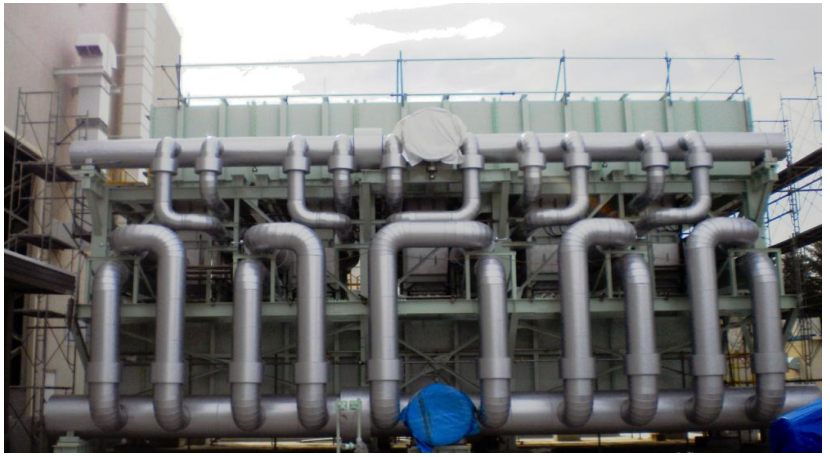
伝熱面密度：1160m^2/m^3（＞1000 m^2/m^3目標）

②高湿分再生熱交換器：・温度効率：90%以上　伝熱面密度：1000m^2/m^{3}以上

●総合試験運転により、温度効率は91.3%、圧力損失は仕様値以下を達成した。
●再生熱交本体間の温度分布は、燃焼排ガス側入口2℃／出口11℃、圧縮空気側入口2℃／出口 5℃となり、10基の熱交換器本体での偏流は最小限とすることが出来た。



40MW用再生熱交換器ユニット　フロー図



再生熱交換器全体ASSY外観

③高湿分燃焼器

③-2高湿分燃焼器
- 圧縮機から全量抽気し燃焼器へ導入
- 多缶燃焼器に対する低圧損構造

③-1高湿分燃焼器
- 構造変更(単缶→多缶)
- 更なる低NOx化

②高湿分再生熱交換器
- 高温・高圧・高湿分対応の高効率熱交換器
- 伝熱ｺｱの大型化
- 構造最適化(圧損低減/偏流防止)

⑤3MW級検証機
- 様々な運転条件による性能検証
- 水回収技術
- 信頼性・耐久性評価

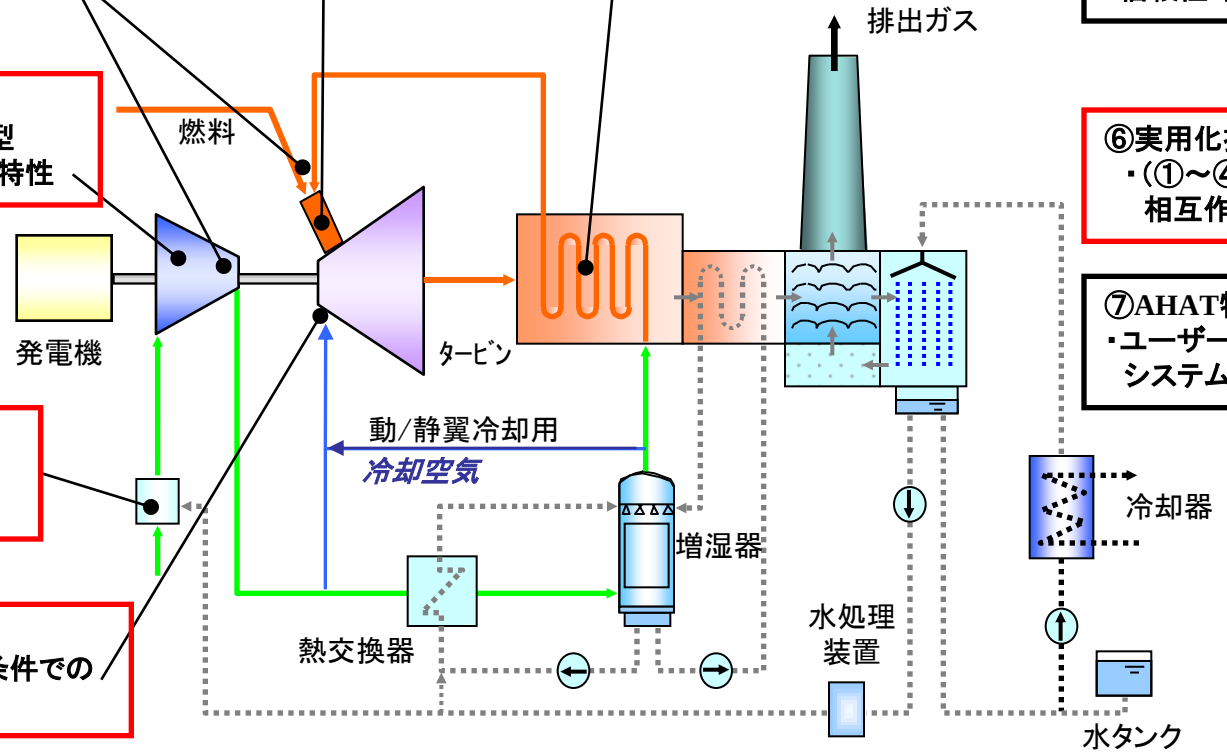
①-2高湿分軸流圧縮機
- 方式：遠心型→軸流型
- 中間冷却効果 & 圧縮特性

⑥実用化技術総合試験
- (①～④)を組合せた相互作用確認

⑦AHAT特性解析
- ユーザー視点に立ったシステム評価

①-1高湿分軸流圧縮機
- 噴霧液滴の微粒化
- 噴霧量の増大

④高湿分冷却翼
- 高温高湿分主流ガス条件での高性能冷却構造



4. 成果、目標の達成度

③高湿分多缶燃焼器：低NOx性能

最大負荷条件でNOx=10.3ppmを確認し，総合試験機飽和加湿条件でNOx＜10ppmの見通しを得た。

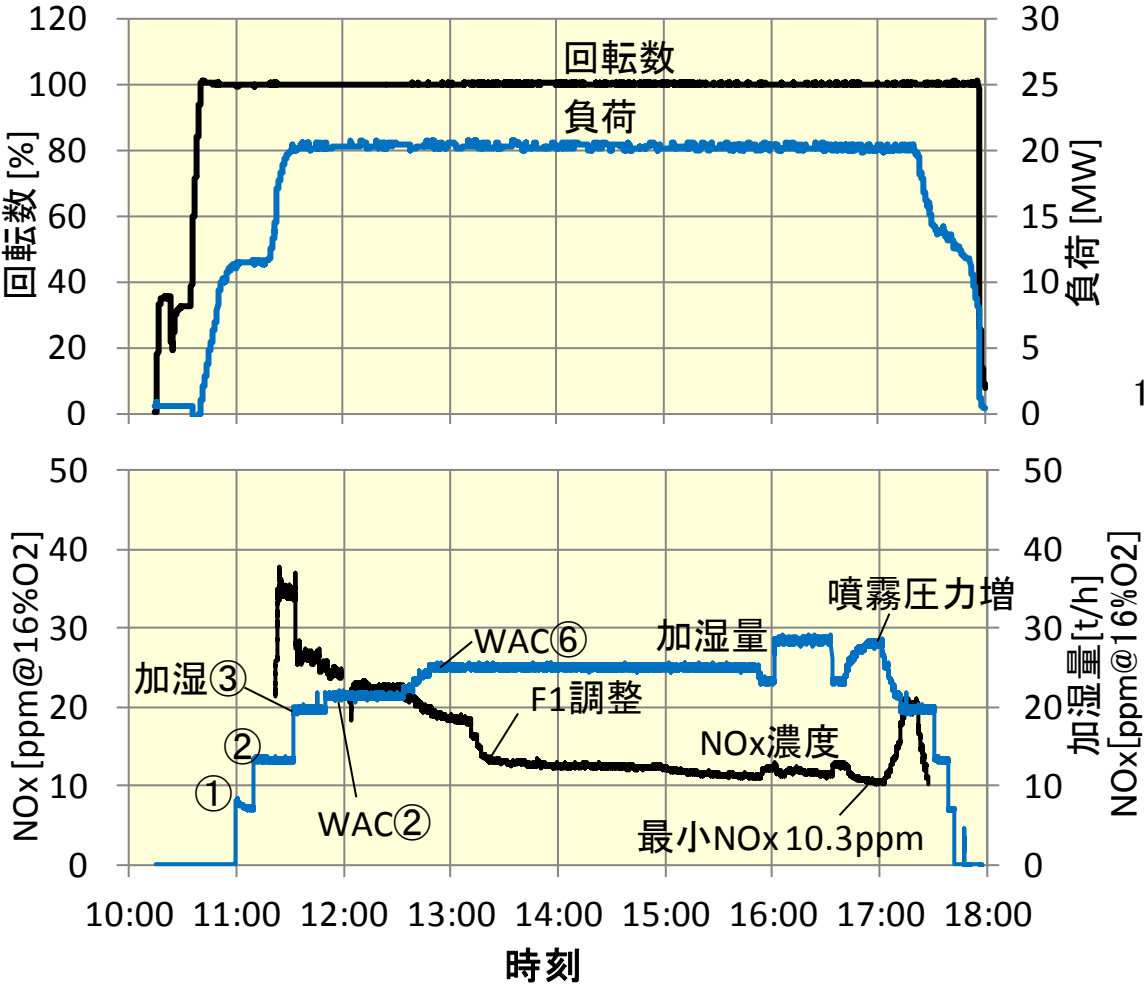
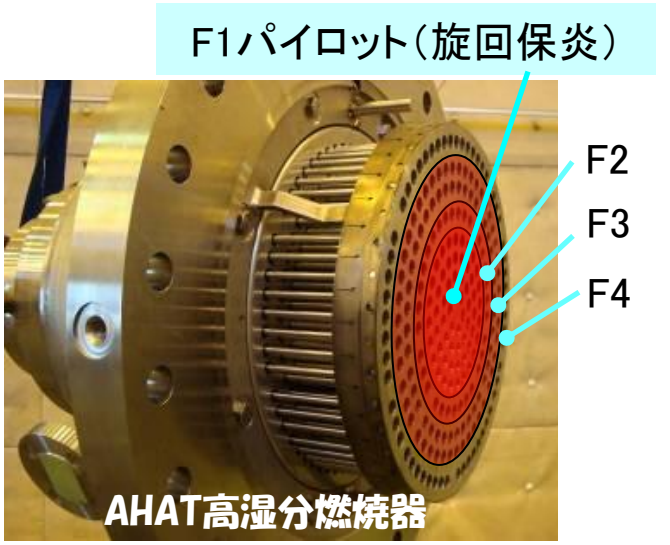


図1　加湿量とNOx排出量



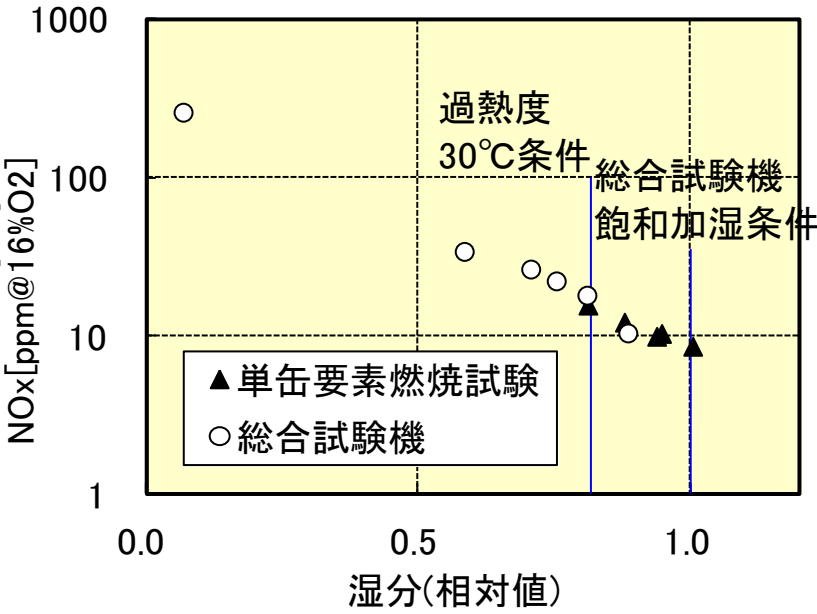


図2　NOxに対する湿分の影響

③高湿分多缶燃焼器：湿分を考慮した安定燃焼制御

運転条件から湿分を推算して，保炎に寄与するF1バーナの燃料を制御するロジックを総合試験機に組み込み，安定燃焼が維持できることを実証した。

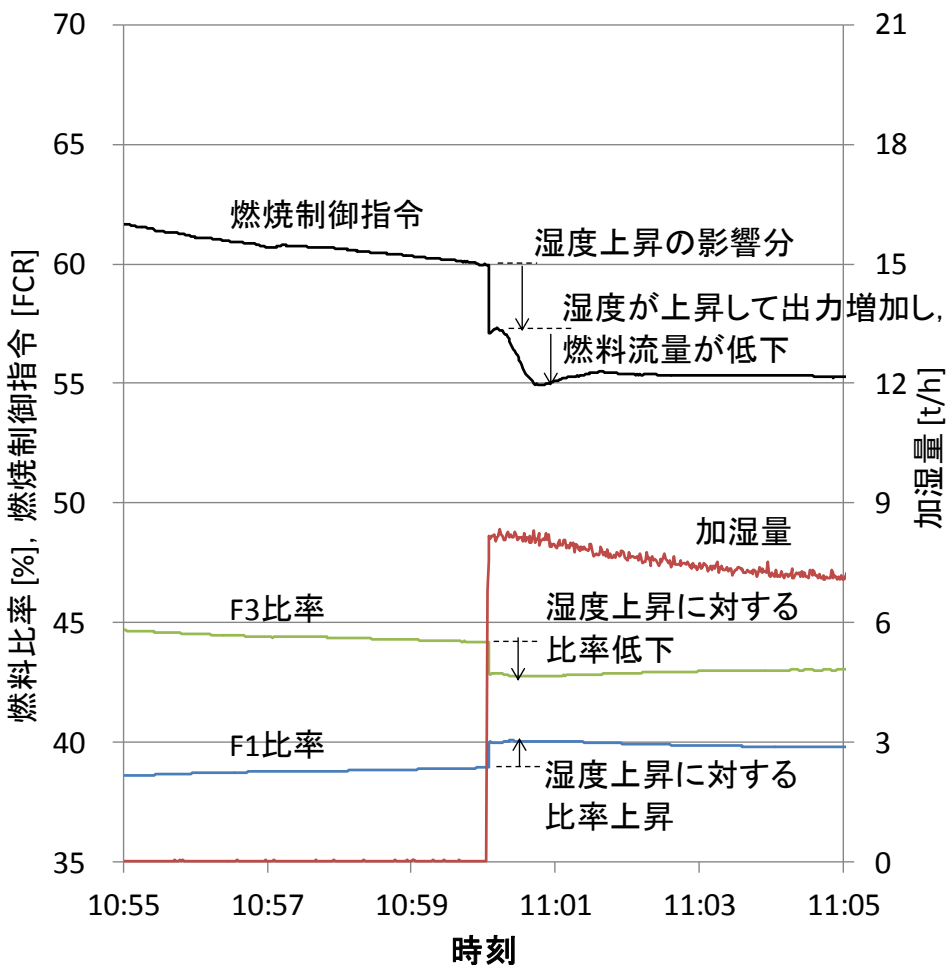


図1　加湿時の燃料比率制御

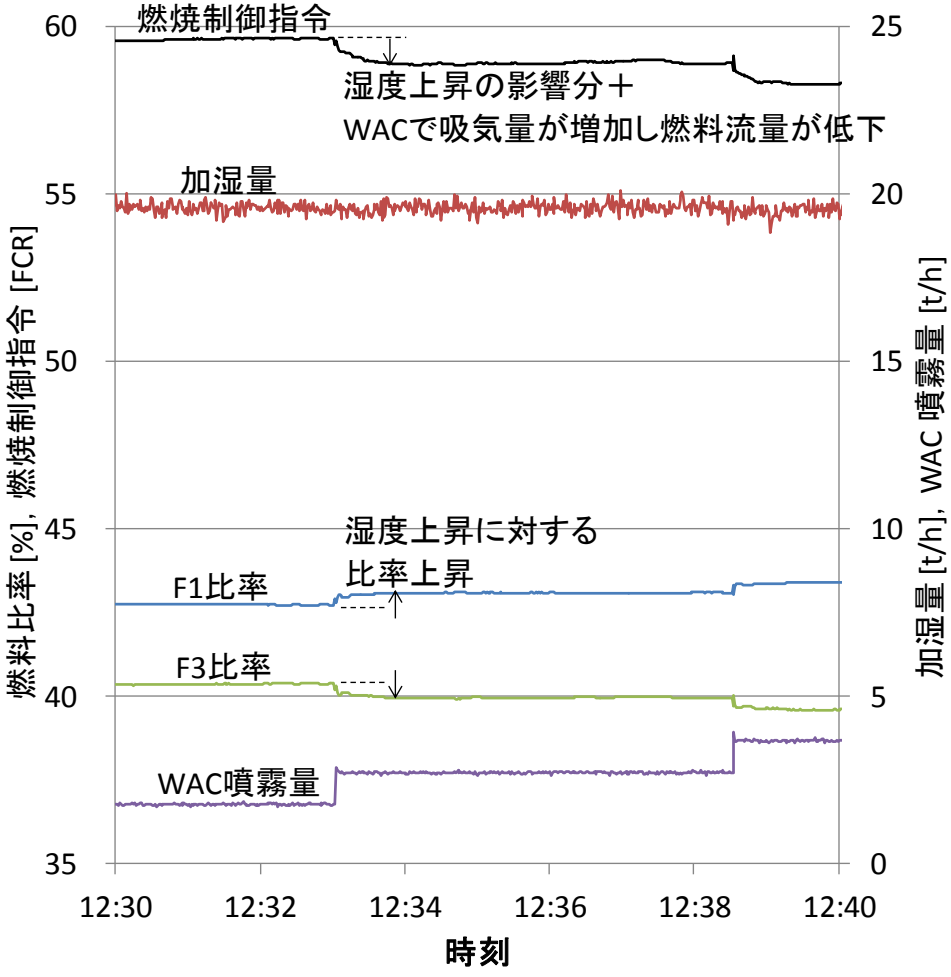
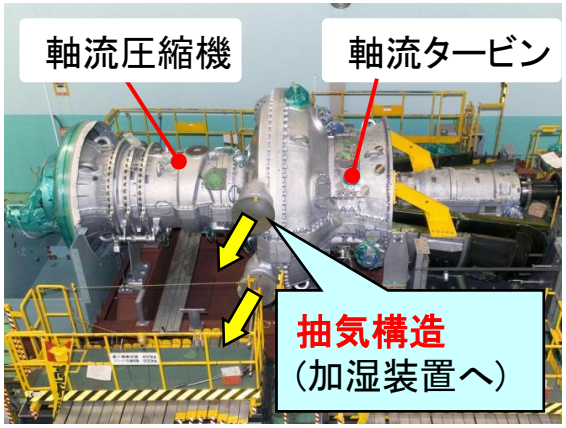


図2　WAC時の燃料比率制御

③高湿分多缶燃焼器：AHAT抽気注入構造の多缶燃焼器への影響

各缶の燃焼安定性の比較により、圧縮空気の抽気構造、加湿、再生後の圧縮空気の注入構造が燃焼器に及ぼす影響が小さいことを確認した。



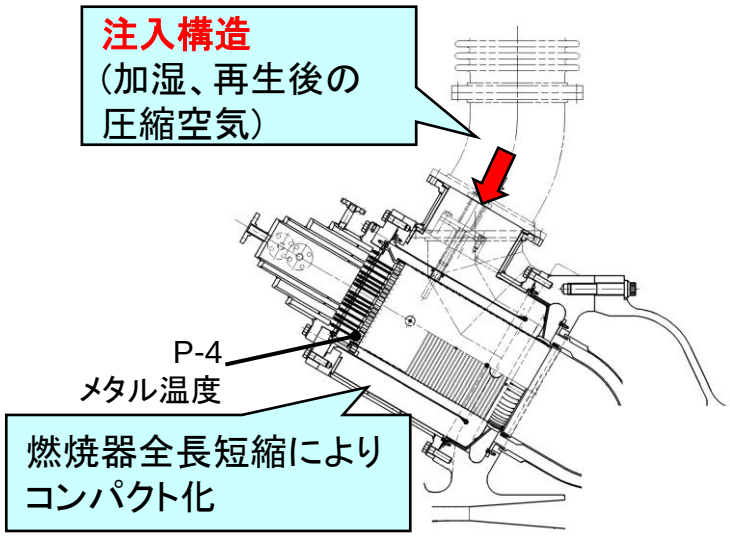


図1　圧縮空気の抽気構造（上）と燃焼器への注入構造（下）

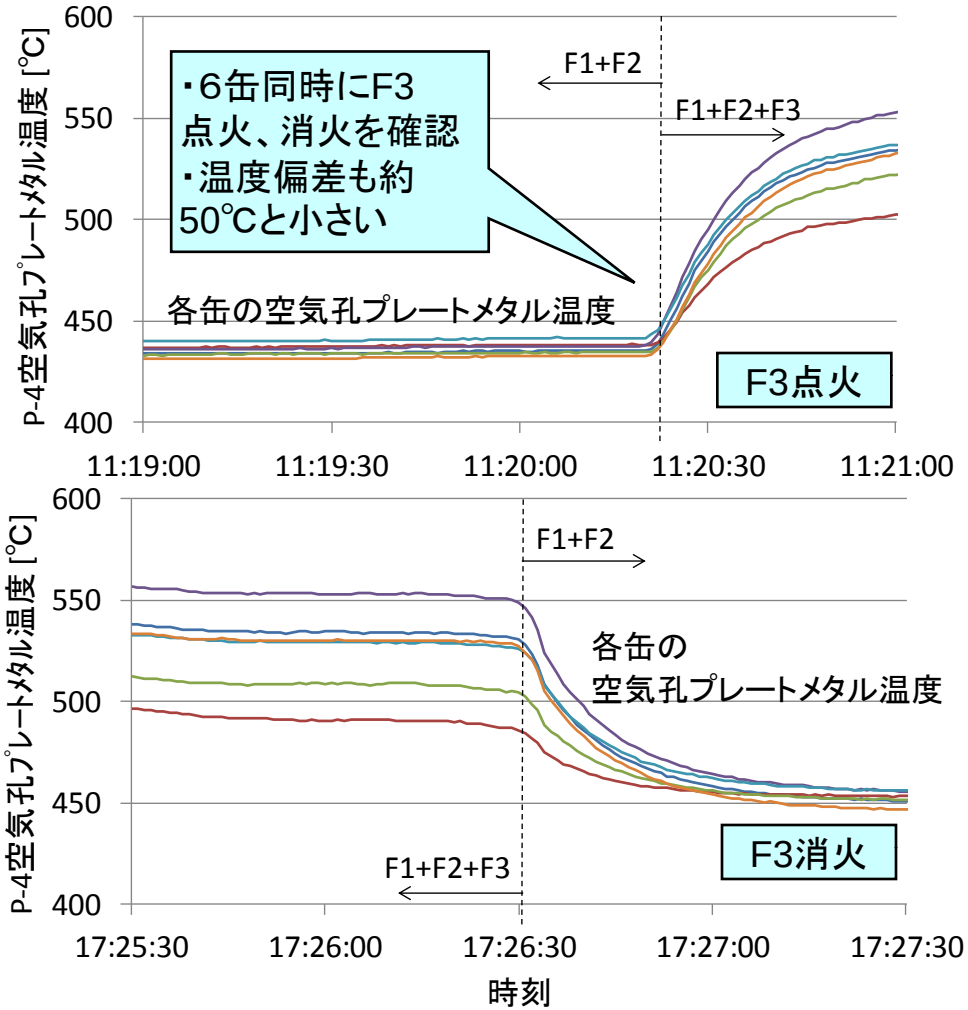


図2　燃料切替え時の各缶のメタル温度変化

④高湿分冷却翼

③−2高湿分燃焼器
・圧縮機から全量抽気し燃焼器へ導入
・多缶燃焼器に対する低圧損構造

③-1高湿分燃焼器
・構造変更(単缶→多缶)
・更なる低NOx化

②高湿分再生熱交換器
・高温・高圧・高湿分対応の高効率熱交換器
・伝熱ｺｱの大型化
・構造最適化(圧損低減/偏流防止)

⑤3MW級検証機
・様々な運転条件による性能検証
・水回収技術
・信頼性・耐久性評価

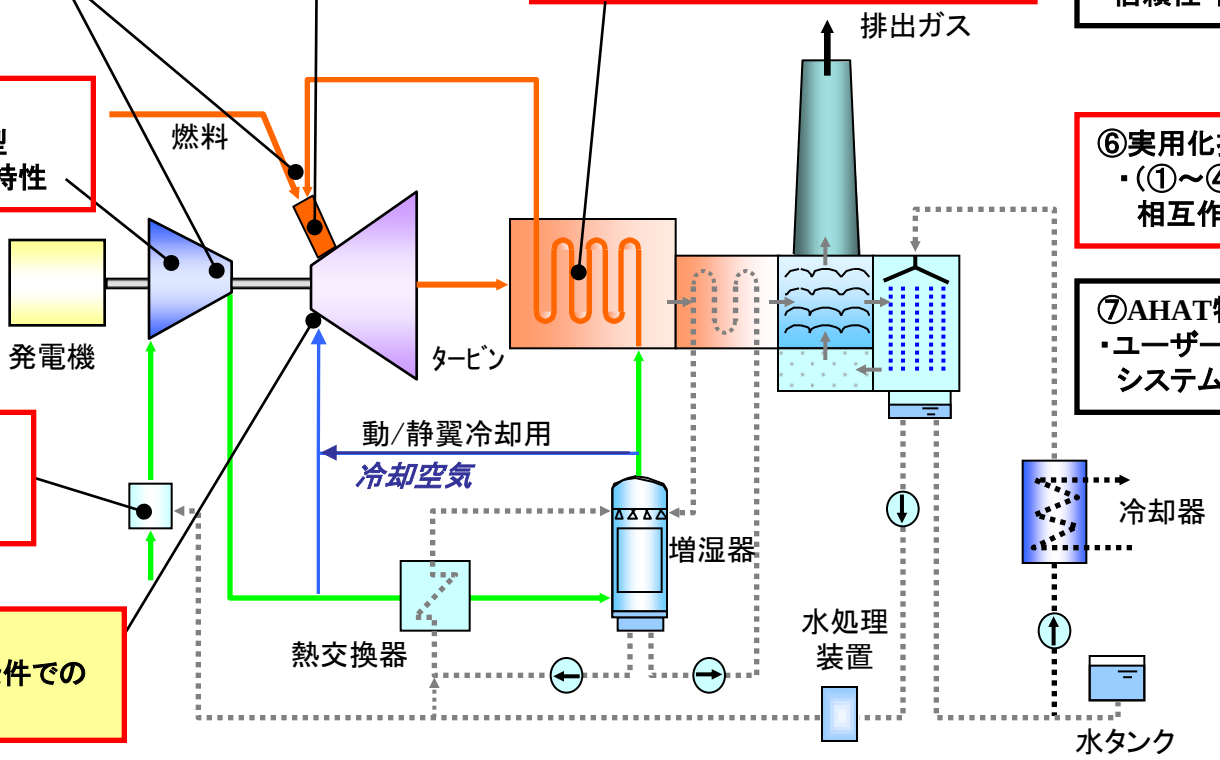
①-2高湿分軸流圧縮機
・方式：遠心型→軸流型
・中間冷却効果 & 圧縮特性

⑥実用化技術総合試験
・(①～④)を組合せた相互作用確認

⑦AHAT特性解析
・ユーザー視点に立ったシステム評価

①−1高湿分軸流圧縮機
・噴霧液滴の微粒化
・噴霧量の増大

④高湿分冷却翼
・高温高湿分主流ガス条件での高性能冷却構造



④高湿分冷却翼：ハイブリッド冷却翼※試験

ハイブリッド冷却翼※を製作し、総合試験装置により従来冷却翼より
少ない冷却空気量で、冷却効率70%以上達成できることを確認した。

※ハイブリッド冷却翼：低温の高湿分空気と、高温の圧縮機吐出空気を併用した新しい冷却構造のタービン翼

図1　ハイブリッド冷却翼組込写真

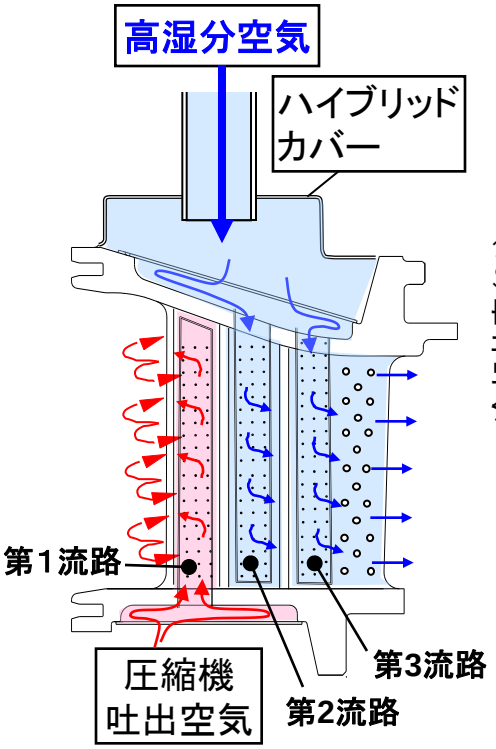


図2　内部冷却構造

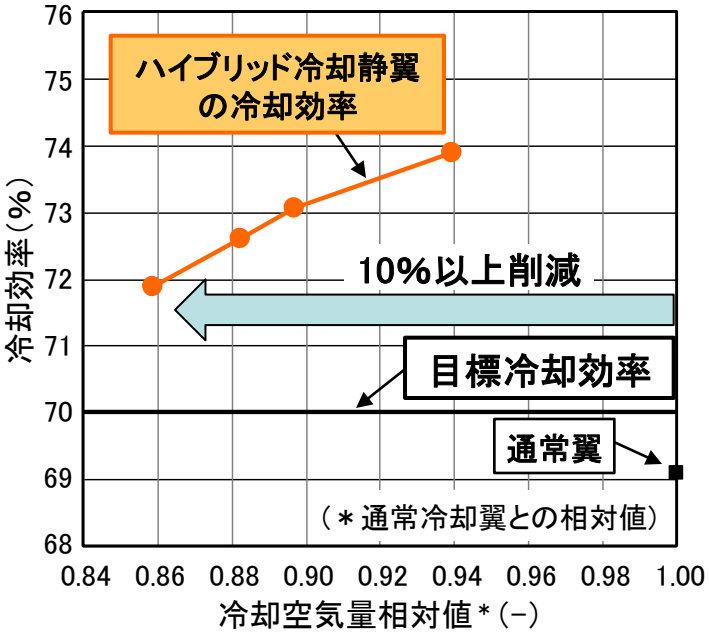


図3　ハイブリッド冷却翼の冷却効率

・第2・第3冷却流路に高湿分空気を
使用する冷却構造を採用し、
熱応力を緩和
・ﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞｶﾊﾞｰを設置して、高湿分
空気をﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ冷却静翼に供給

⑤3MW級検証機

③−2高湿分燃焼器
・圧縮機から全量抽気し燃焼器へ導入
・多缶燃焼器に対する低圧損構造

③-1高湿分燃焼器
・構造変更(単缶→多缶)
・更なる低NOx化

②高湿分再生熱交換器
・高温・高圧・高湿分対応の高効率熱交換器
・伝熱ｺｱの大型化
・構造最適化(圧損低減/偏流防止)

⑤3MW級検証機
・様々な運転条件による性能検証
・水回収技術
・信頼性・耐久性評価

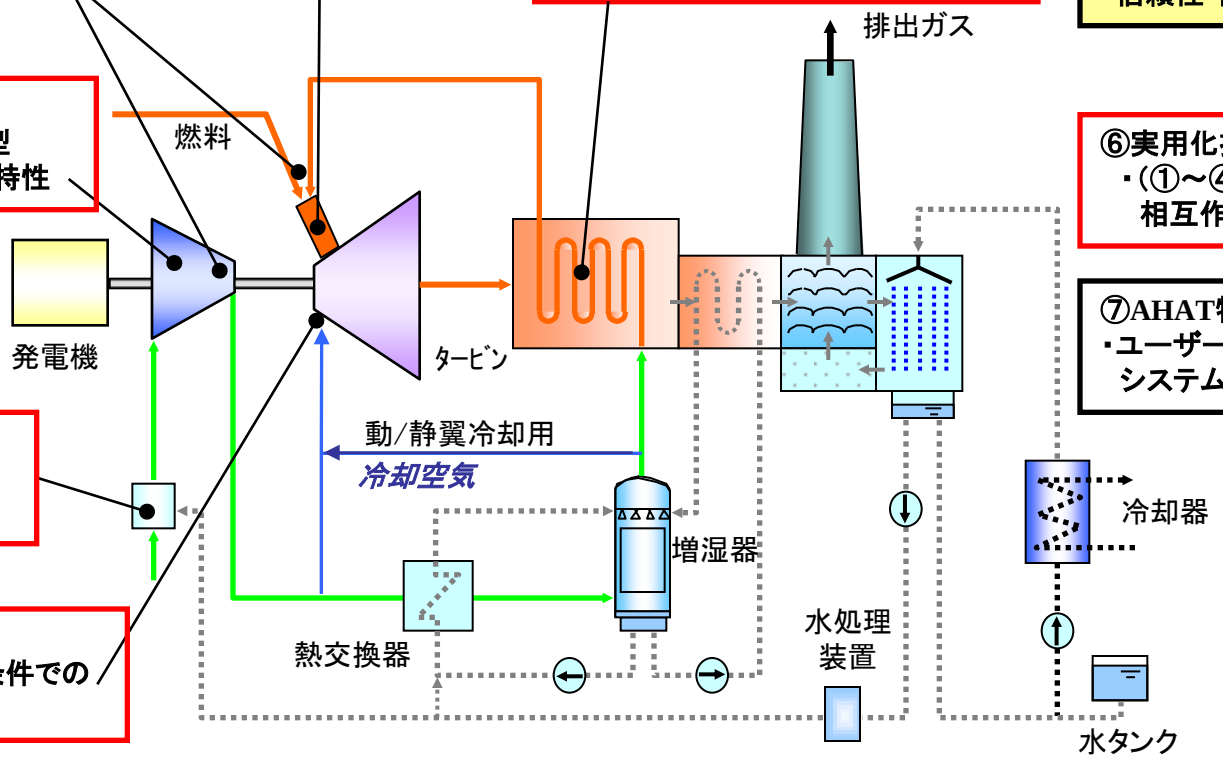
①-2高湿分軸流圧縮機
・方式：遠心型→軸流型
・中間冷却効果 & 圧縮特性

⑥実用化技術総合試験
・(①～④)を組合せた相互作用確認

⑦AHAT特性解析
・ユーザー視点に立ったシステム評価

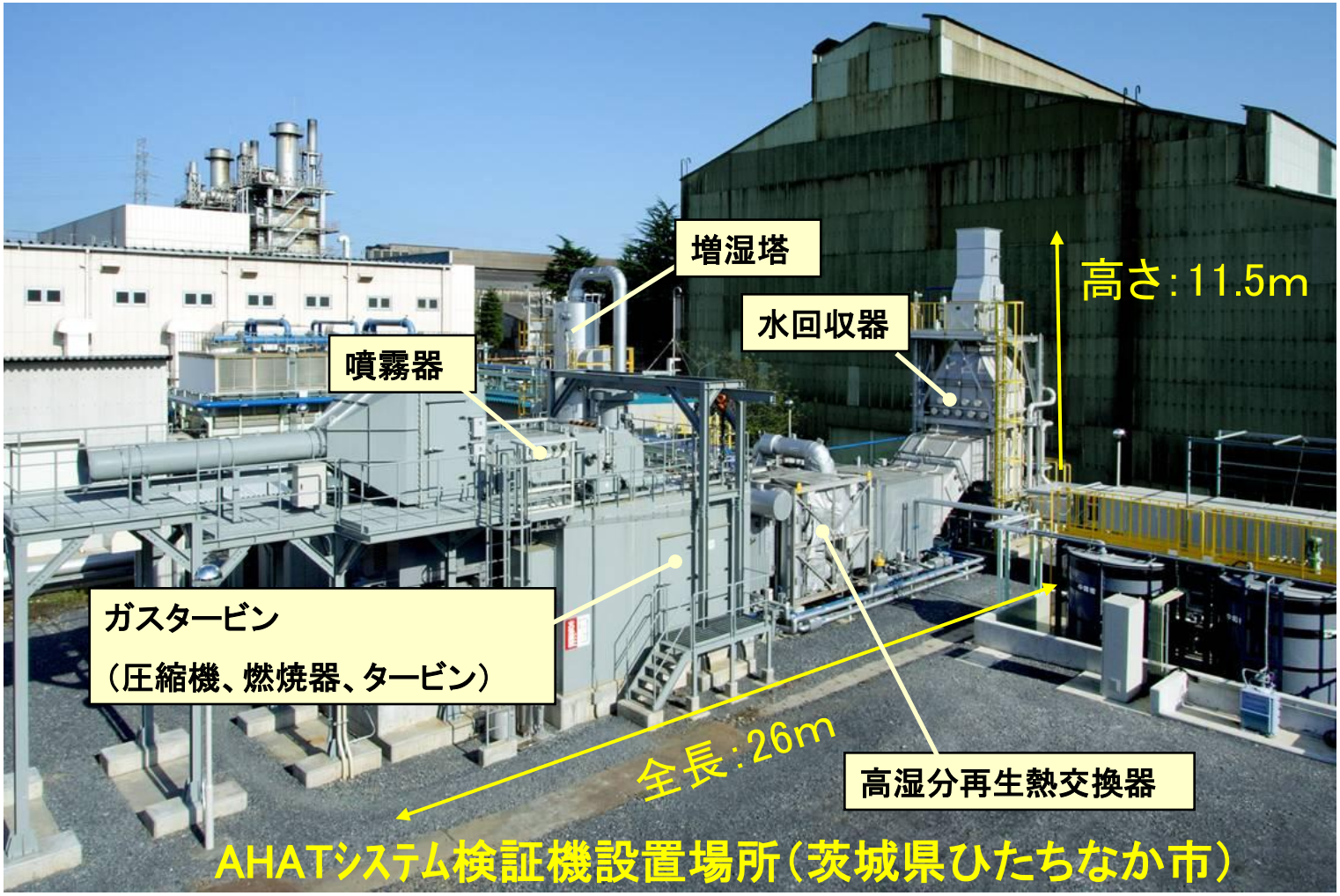
①−1高湿分軸流圧縮機
・噴霧液滴の微粒化
・噴霧量の増大

④高湿分冷却翼
・高温高湿分主流ガス条件での高性能冷却構造



⑤3MW級検証機：AHATプラント側の特性把握

AHATシステムの成立性を確認する目的で、要素技術開発（04～06年）にて製作した。この装置を用いて、AHATシステム特性、機器性能の向上、主要機器の経時変化を確認した。



⑤3MW級検証機：AHATプラント側の特性把握（性能検証）

大気温度特性は予測値と同様な傾向を示し、気温が低いほど高出力、高効率になっている。コールド起動は、起動開始後約60分でフル負荷に到達し、高速起動できることを確認した。

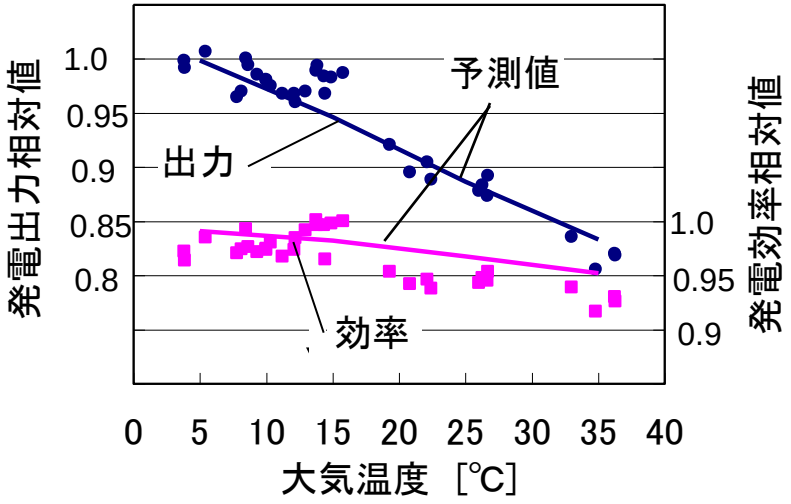


図　大気温度特性の測定結果

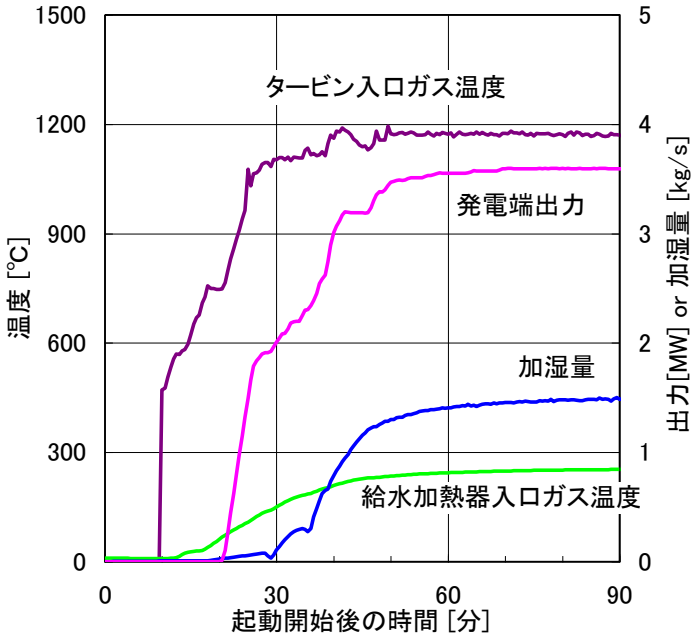


図　コールド起動特性の測定結果

⑤3MW級検証機：AHATプラント側の特性把握（水回収技術）

スプレイノズル配置の工夫により、液滴空間分布が均一化し、回収率が向上、
増湿塔加湿量のほぼ100%を回収可能となった。

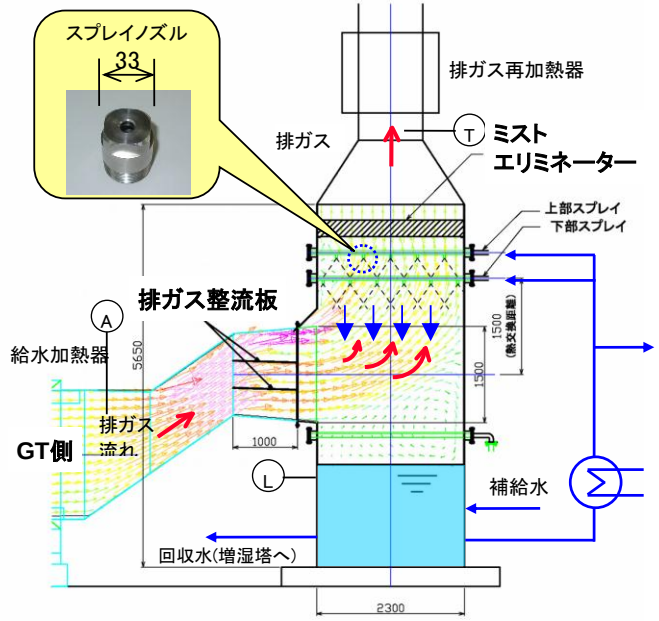
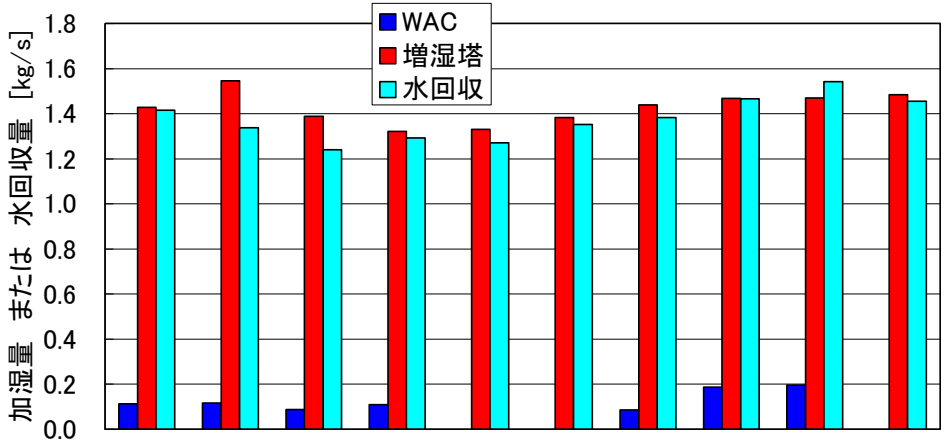


図　水回収装置の断面図



試験ケース名		WR1	WR2	WR3	WR4	WR5	WR6	WR7	WR8	WR9	WR10
機器状態	排ガス整流板	従来		GT側に100mm移動							
	スプレイノズル	従来			微細化			分布均等Ⅰ		分布均等Ⅱ	
	ミストエリミネーター	従来					微細化				

図　増湿塔による加湿量と、水回収装置による回収量の比較

⑤3MW級検証機：AHATプラント側の特性把握（耐久性）

高湿分再生熱交換器の温度効率、排ガス側圧力損失、空気側圧力損失の経時変化は特に見られなかった。制限値を満足している。

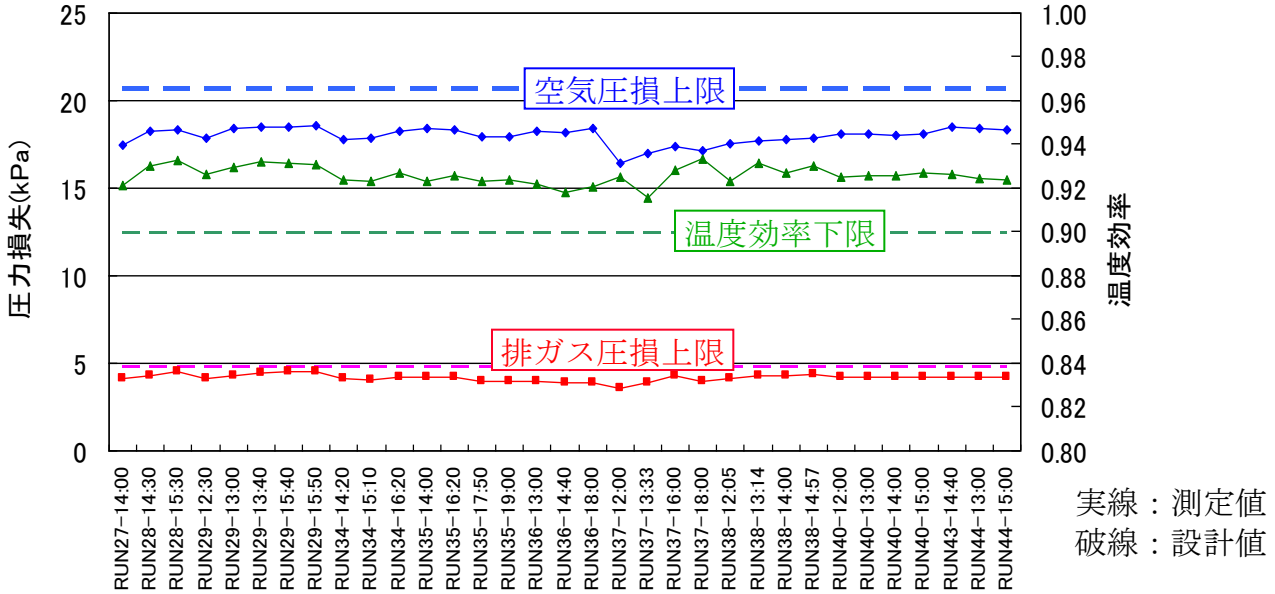


図　高湿分再生熱交換器の経時変化（圧損、温度効率）

⑥実用技術総合試験

③−2高湿分燃焼器
・圧縮機から全量抽気し燃焼器へ導入
・多缶燃焼器に対する低圧損構造

③-1高湿分燃焼器
・構造変更(単缶→多缶)
・更なる低NOx化

②高湿分再生熱交換器
・高温・高圧・高湿分対応の高効率熱交換器
・伝熱ｺｱの大型化
・構造最適化(圧損低減/偏流防止)

⑤3MW級検証機
・様々な運転条件による性能検証
・水回収技術
・信頼性・耐久性評価

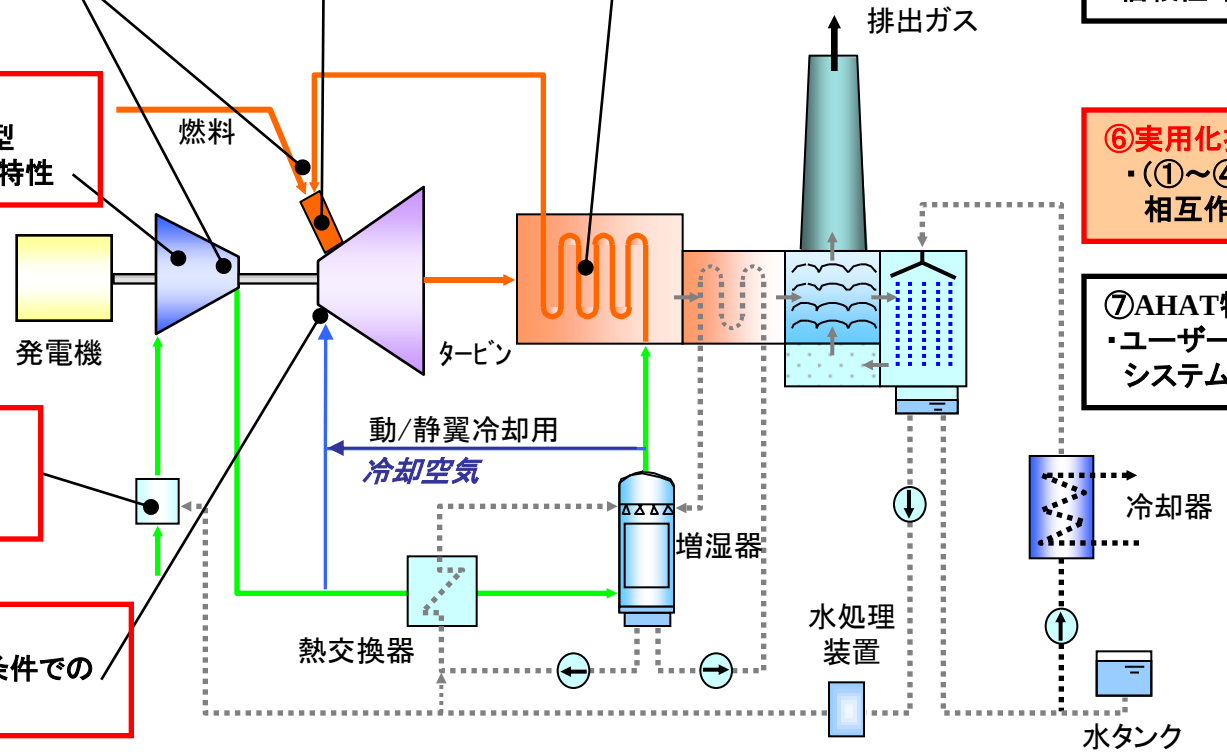
①-2高湿分軸流圧縮機
・方式：遠心型→軸流型
・中間冷却効果 & 圧縮特性

⑥実用化技術総合試験
・(①〜④)を組合せた相互作用確認

⑦AHAT特性解析
・ユーザー視点に立ったシステム評価

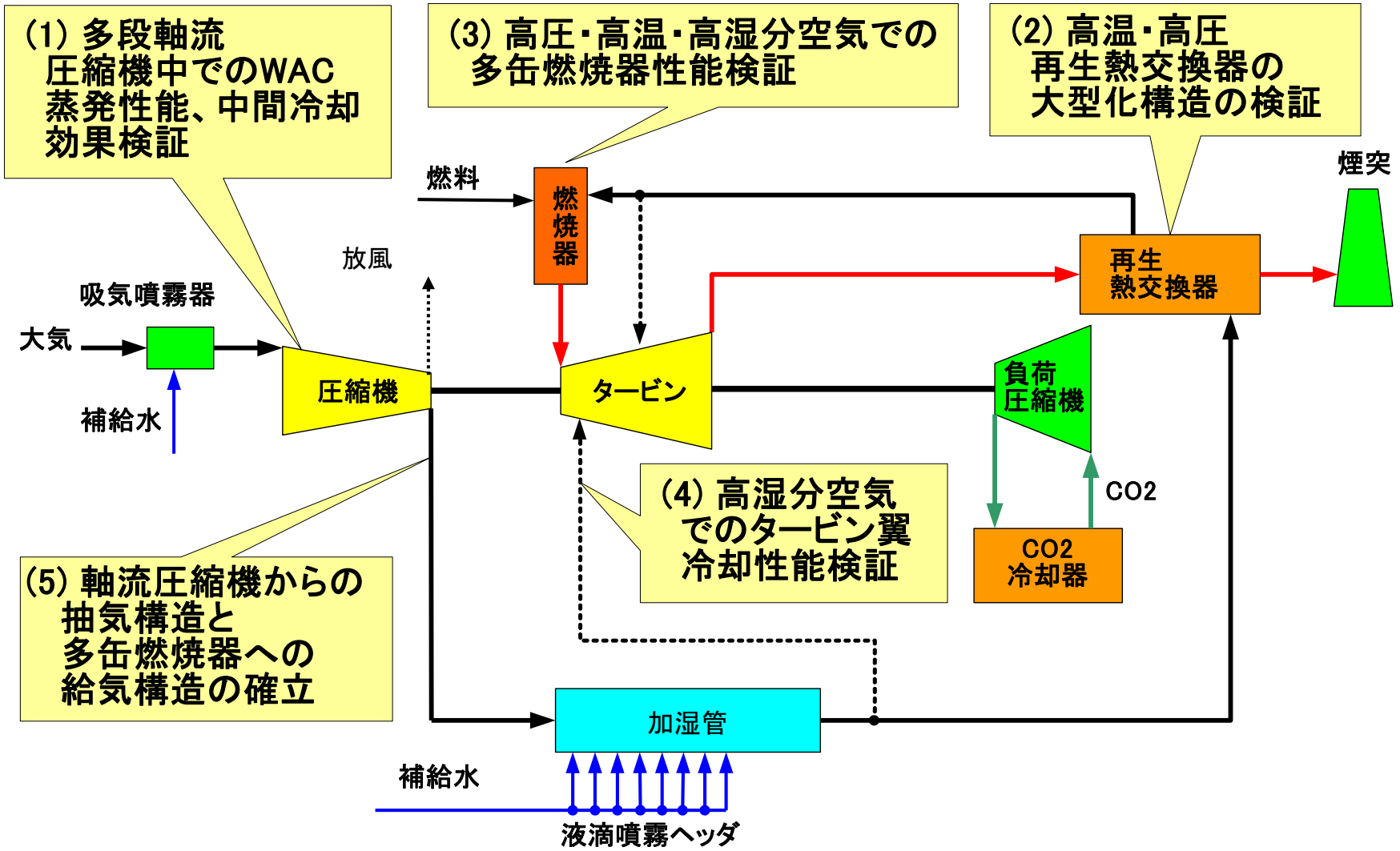
①−1高湿分軸流圧縮機
・噴霧液滴の微粒化
・噴霧量の増大

④高湿分冷却翼
・高温高湿分主流ガス条件での高性能冷却構造



⑥実用技術総合試験：目的

重構造(ヘビーデューティー)ガスタービンを用いて、高圧・高湿分環境における、軸流圧縮機、再生熱交換器、多缶燃焼器、冷却翼の相互作用を確認する。



⑥実用技術総合試験：40MW級総合試験装置

図　システム機器

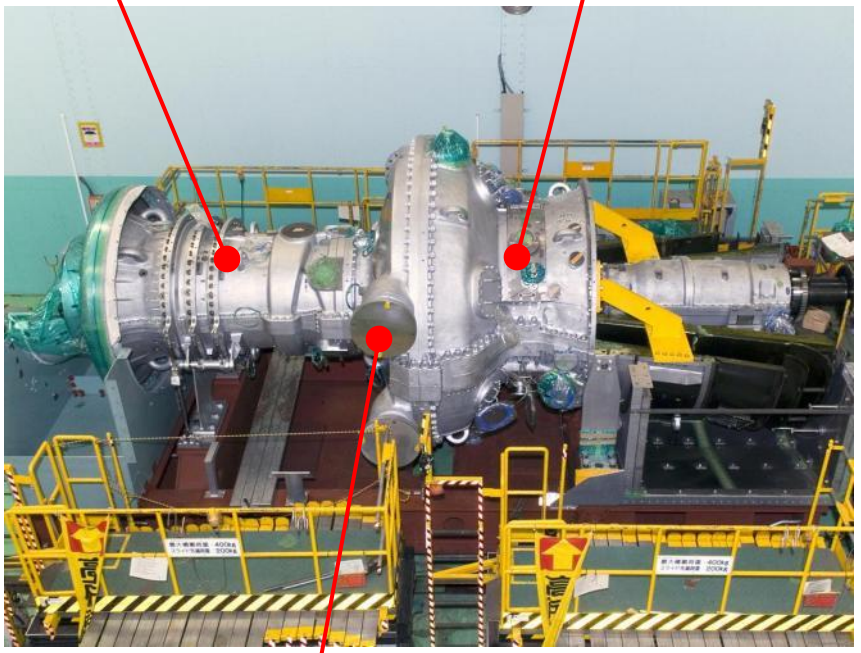


図　ガスタービン本体

⑥実用技術総合試験：40MW級総合試験装置の熱物質収支

・2012/1に運転開始し、2012/2に、負荷20MWまで到達した。
・吸気噴霧冷却、加湿管、再生熱交換器、高湿分冷却翼など、運転動作確認した。

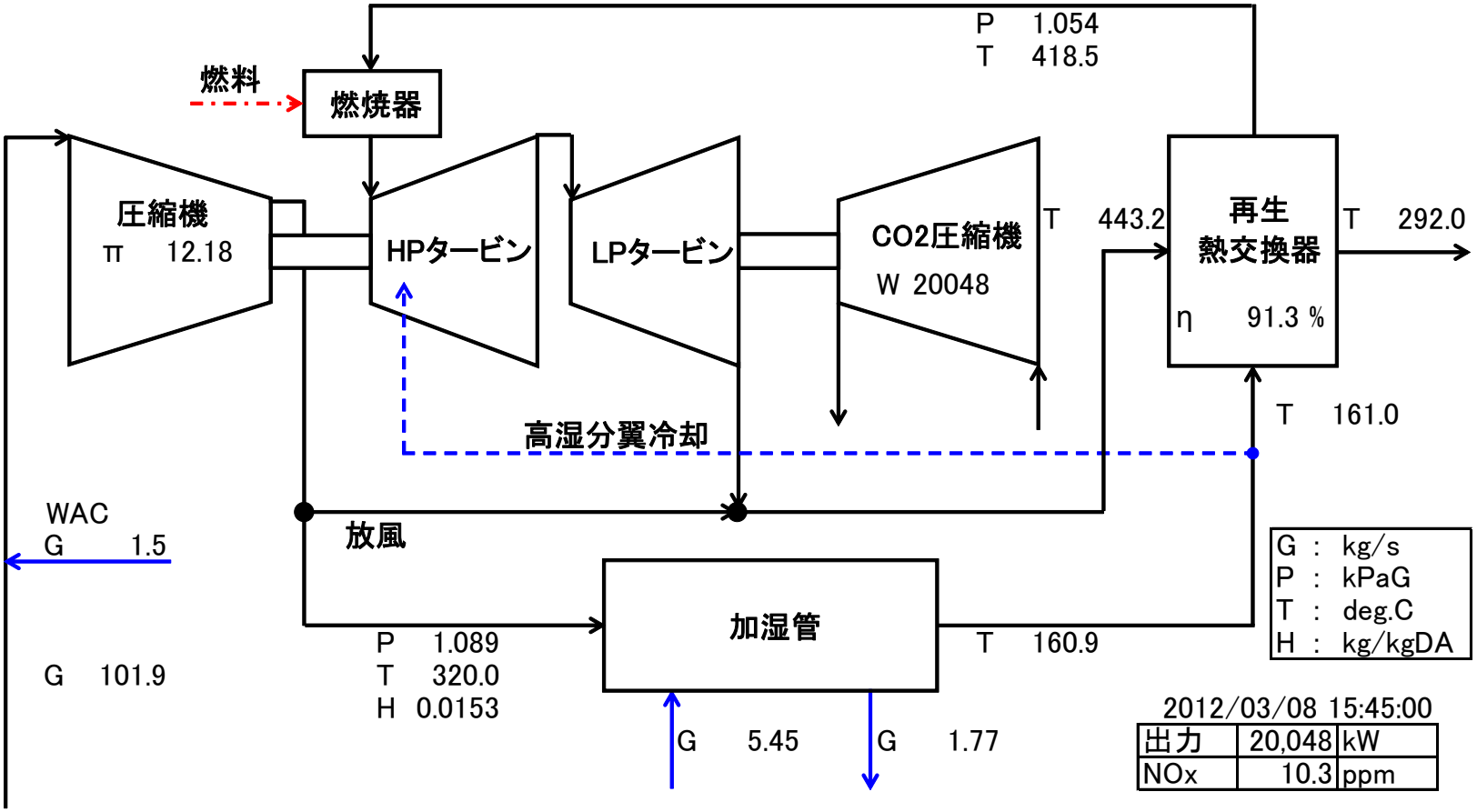


図 ヒートラン試験(RUN45)のプラント状態量測定結果

⑥実用化技術総合試験：総合試験装置の運転結果

2012/1～3の期間に、29回の起動、累計65時間運転し、吸気噴霧冷却、加湿管、再生熱交換器、高湿分冷却翼などの相互作用（性能）を確認、課題摘出した。

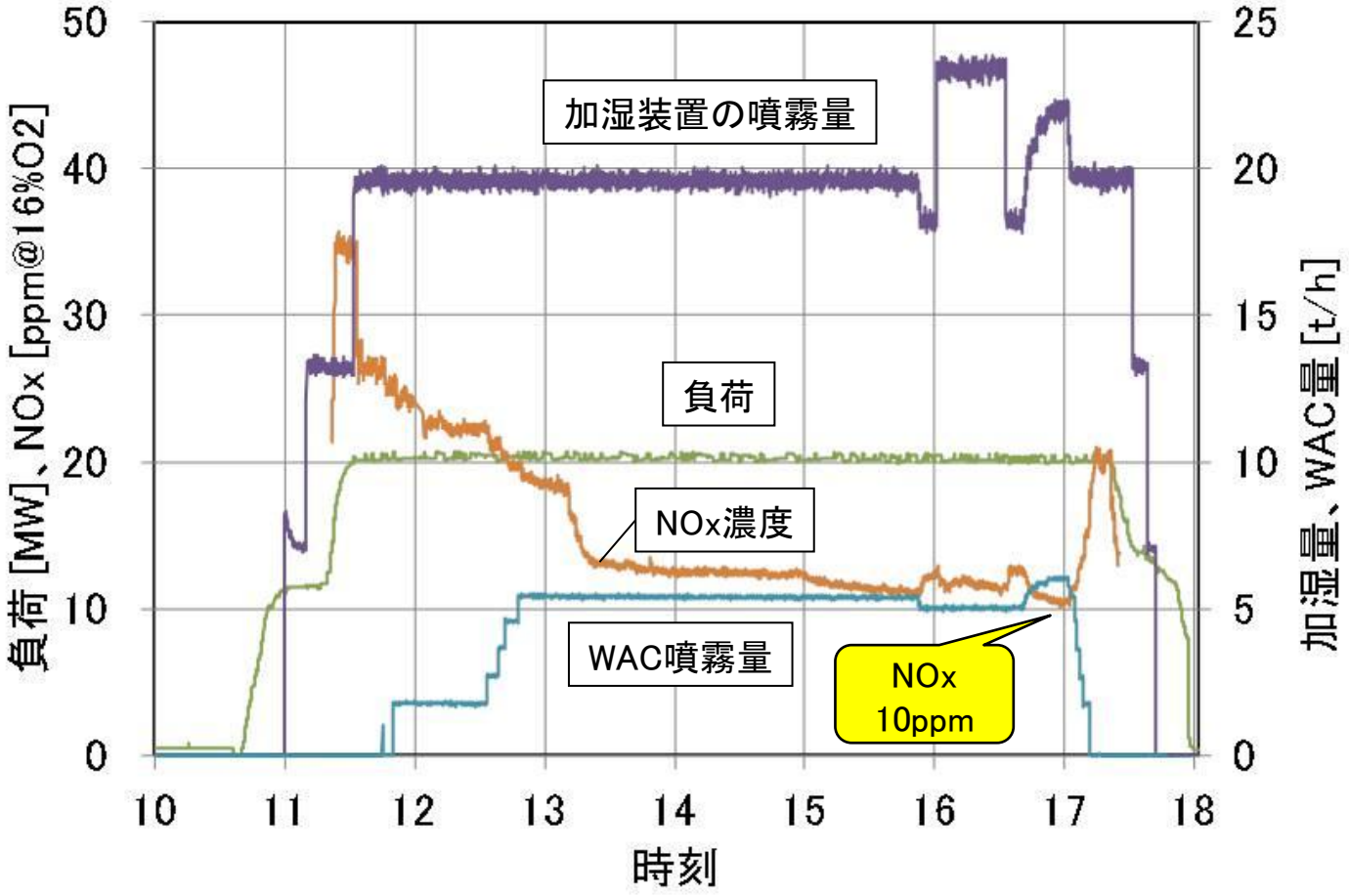
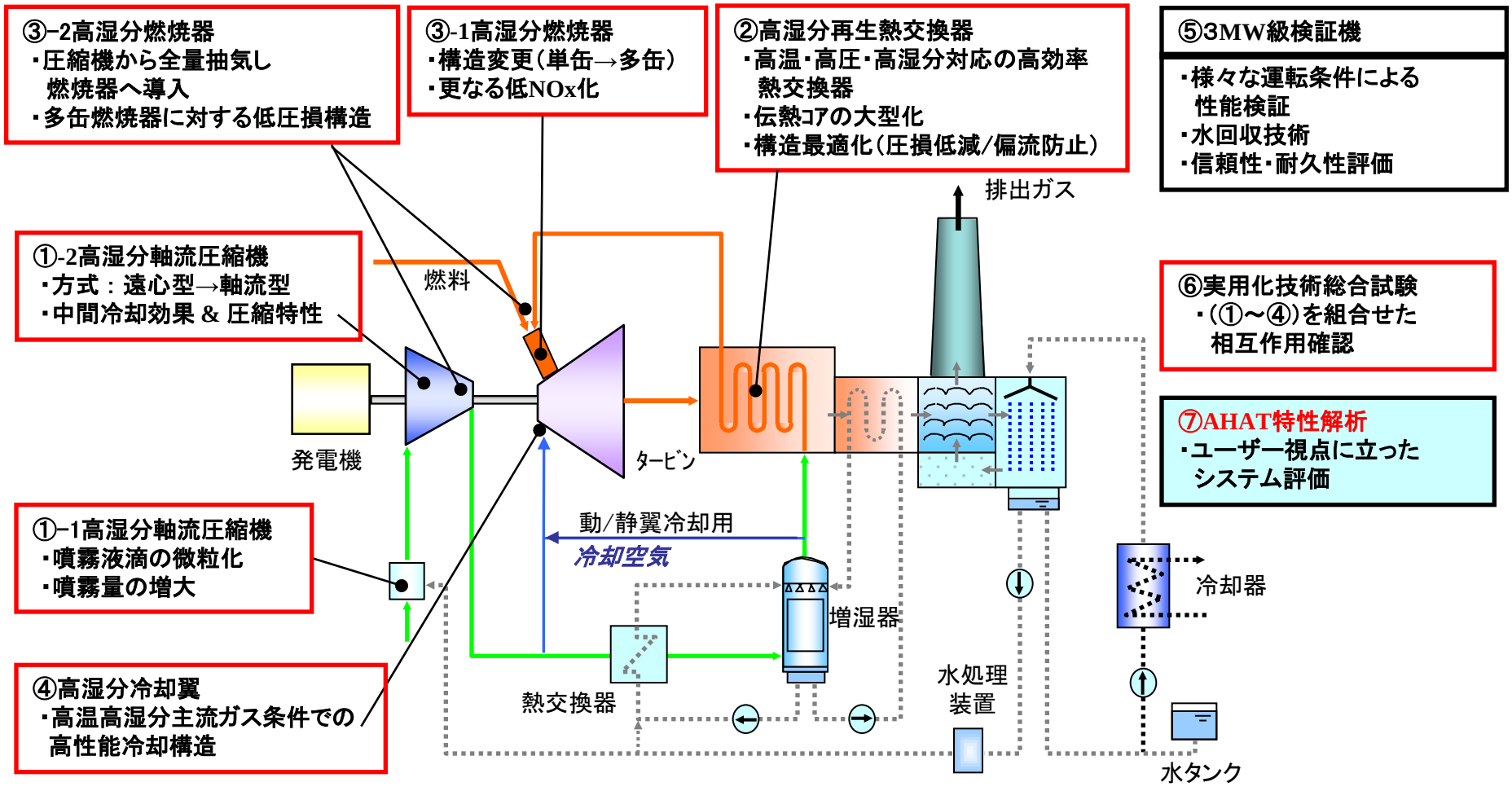


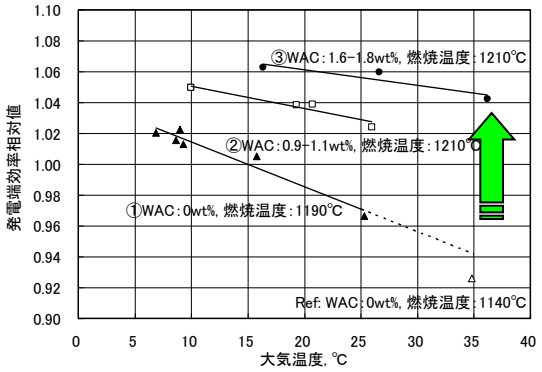
図　40MW級総合試験装置の運転曲線(2012年3月8日)

⑦AHAT特性解析

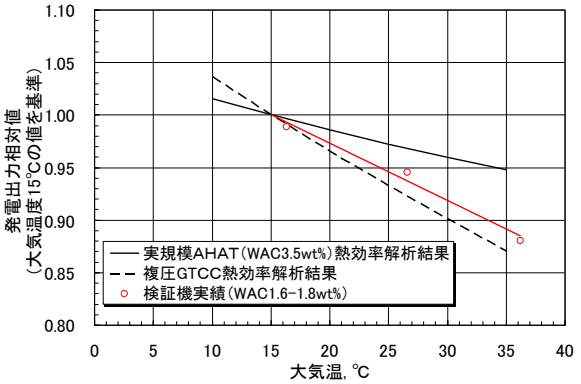

③−2高湿分燃焼器
・圧縮機から全量抽気し
燃焼器へ導入
・多缶燃焼器に対する低圧損構造
③-1高湿分燃焼器
・構造変更(単缶→多缶)
・更なる低NOx化
②高湿分再生熱交換器
・高温・高圧・高湿分対応の高効率
熱交換器
・伝熱ｺｱの大型化
・構造最適化(圧損低減/偏流防止)
⑤3MW級検証機
・様々な運転条件による
性能検証
・水回収技術
・信頼性・耐久性評価
①-2高湿分軸流圧縮機
・方式：遠心型→軸流型
・中間冷却効果 & 圧縮特性
燃料
排出ガス
⑥実用化技術総合試験
・(①～④)を組合せた
相互作用確認
⑦AHAT特性解析
・ユーザー視点に立った
システム評価
発電機
ﾀｰﾋﾞﾝ
①−1高湿分軸流圧縮機
・噴霧液滴の微粒化
・噴霧量の増大
動/静翼冷却用
冷却空気
増湿器
冷却器
水処理
装置
熱交換器
④高湿分冷却翼
・高温高湿分主流ガス条件での
高性能冷却構造
水タンク

⑦AHAT特性解析：3MW級検証機評価

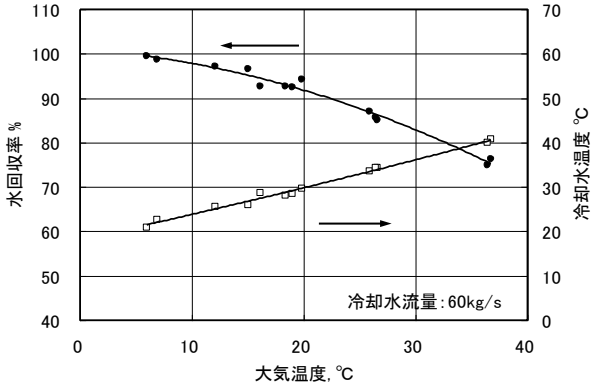
- ●吸気水噴霧による効率向上が確認できた。
- ● 大気温度上昇による出力低下がGTCCより小さいことが確認できた
- ●水回収効率が大気温度上昇により低下したため改善が必要である。
- ●部分負荷特性もスケールアップ機での検証が必要である。



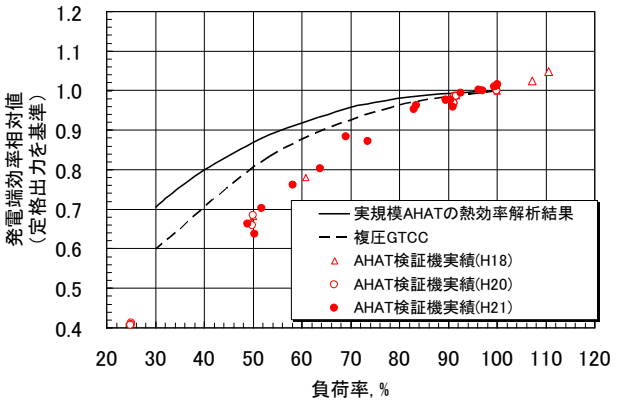
(1) 吸気湿分率および大気温度変化に対する発電端効率の変化



(2) AHATとGTCCの大気温度変化に対する出力への影響の比較



(3) 大気温度変化に対する水回収率および冷却水温度の変化



(4) AHATとGTCCの部分負荷効率の比較

⑦AHAT特性解析：3MW級検証機評価

●コールドスタート時の起動時間が約60分と第1フェーズ試験から大幅に短縮、向上できた。
●既存複合発電の起動時間、負荷変化率を上回る結果を得た。

【各種運用性の比較】

項　目	検証機実績(第 1 フェーズ)	**検証機実績(第 2 フェーズ)**	既存一軸型 GTCC 発電	課　題
起動時間 ホットスタート	－	－	約 60 分	
〃 コールドスタート	約 2 時間 40 分 （静定、データ採取時間含む）	**約 60 分** **（水系統起動時の場合）**	約 180 分 （復水器真空保持の場合）	水系統の自動化
負荷変化率	燃焼による負荷変化 3.3%/分 加湿による負荷変化 2.3%/分	**燃焼による負荷変化** **15%/分**（自動化） **加湿による負荷変化** **3.3%/分**（手動操作）	5.0%/分	加湿による負荷変化率向上
負荷制御	燃焼温度制御 増湿塔加湿量あり、なし WAC あり、なし	**燃焼温度制御** **増湿塔加湿量** **WAC 流量**	IGV 開度制御 燃焼温度制御	IGV の設置 低負荷での水噴霧

※WAC：
Water Atomization Cooling
（吸気噴霧冷却）

※IGV：
Inlet Guide Vane
（入口案内翼）

研究開発成果 :学会表彰、論文、特許等の出願・発表状況

●学会で高い評価を受け、海外で4件、国内で2件、学会から表彰※されている。

●3MW級検証機、40MW級総合試験装置は、国内外の多数の顧客に視察頂き、ユーザーに関心を持たれている。

※主な学会表彰
・ASME Turbo EXPO, J. P. Davis Award (2010年6月)
・ASME Turbo EXPO, Best Paper Award (Cycle Innovations 部門) (2009年6月)
・日本ガスタービン学会 技術賞(2008年4月)

	要素技術開発				実用化技術開発				
年度 / 項目	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	合計
論文・解説	0	2	1	2	3	3	4	8	23
特許(公開)	3	10	12	7	8	11	6	6	63
国際会議発表	1	2	1	2	4	1	1	6	18
国内会議発表	2	0	5	7	5	1	3	1	24

5. 事業化、波及効果

事業化(商用化)の計画

●本技術は実用化技術開発の段階にあり、本技術完成後は実証機による熱、環境、運転性能、長期信頼性を評価し商用機につなげていく必要がある。

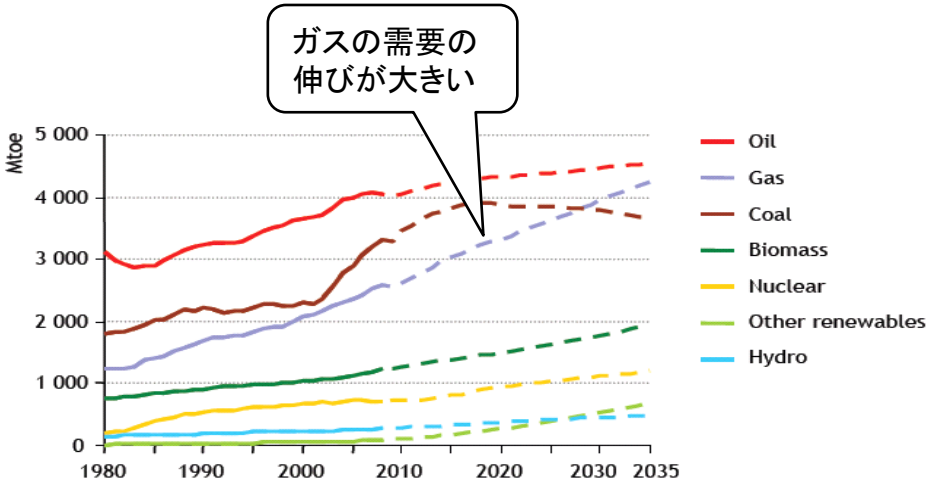
●本技術の一部は既に製品に適用済であり、ガスタービンの高性能化に寄与している。

項目＼年度	2000	2005	2010	2020～
技術開発	要素技術開発（'04～'06年） 1/30規模の装置でAHATシステムの原理的な成立性確認。 （3MW級検証機）	実用化技術開発（'08～'11年） 1/3規模の装置で中容量AHATシステムを実現するためのガスタービンに関わる要素技術を開発。 （40MW級総合試験設備）	技術実証事業（'12年～） 高信頼性化技術の開発とAHATシステムの長期信頼性実証。 （実証機）	商用機（'20年～）
技術開発の成果、波及		・高湿分翼冷却翼技術 ・高湿分燃焼器技術 →日立ガスタービンに適用		・リプレース ・系統調整電源 ・海外分散電源
次世代発電技術への展開			CO2回収型クローズドサイクルAHAT	CO2回収型IGHAT

ガス火力発電の今後の見通しと市場規模

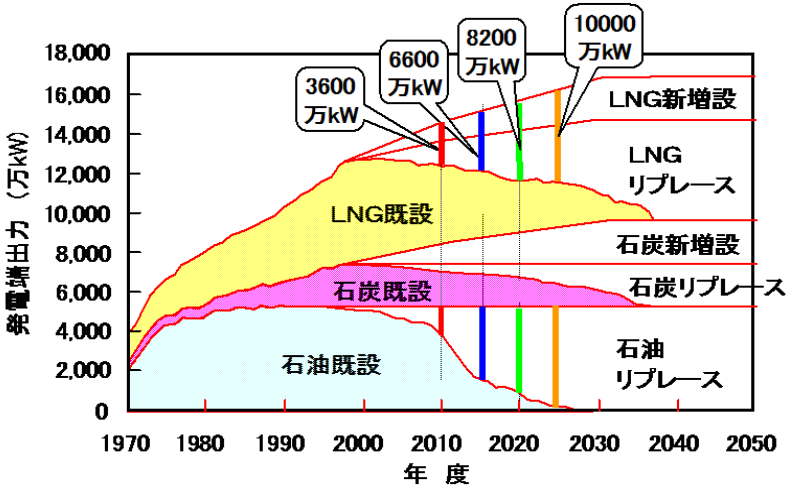
●シェールガスなど非在来型ガスの掘削技術が開発され、天然ガスは世界的な需要拡大が見込まれる。

●LNG火力発電のリプレース潜在需要は、2020年に約8,000万kWと見込まれ、これらの国内リプレース市場にAHATを導入していく。



世界エネルギー需要予測

出典：IEA World Energy Outlook (2011)



日本における電源構成の推移推定例(寿命40年)

出典：電力中央研究所「第18回ｴﾈﾙｷﾞ未来ﾌｫｰﾗﾑ」(1999)

AHATのセールスポイントとユーザーのメリット

●中小容量クラスでは、欧米メーカーが技術的に先行し、販売シェアを占めている。
●独自の高湿分空気利用によるセールスポイントを付加して、事業化する。

比較項目		AHAT（目標）		GTCC(ガスタービンコンバインドサイクル)	顧客ターゲットとメリット
効率	発電効率	○	200MW以下の同出力レベルでGTCCと同等以上	ベース	・日本、欧米：CO2削減による環境保全 ・アジア、欧州：ランニングコスト低減による経済性向上
運用性	起動時間	◎	ホット起動：30分 コールド起動：60分 （蒸気タービン無）	ホット起動：60分 コールド起動： 180分 （蒸気タービンの暖機必要）	全地域：再生可能エネルギーとの連携（負荷変動への対応）
	負荷変化率（時間あたりの出力の変化率）	◎	ガスタービン単独の場合と同等（10%/min程度）	蒸気タービンの負荷変化率に依存（5%/min程度）	
環境性	NOx（窒素酸化物）排出濃度	○	脱硝装置無しで10ppm以下（高湿分燃焼）	脱硝装置必須	日本、欧米：低NOx排出による環境保全
	立地の自由度	◎	水回収装置の空冷化が比較的容易、内陸部にも設置可能 伝熱面積：50%	蒸気タービンの復水器の空冷化は伝熱面積大きく、臨海立地向き 伝熱面積：100%	・日本：自治体、事業者向けリスク回避型分散電源(内陸立地) ・中東、アフリカ、欧米：内陸部、グリッド未整備地域へ中小容量分散電源
経済性	機器コスト	◎	蒸気タービン系無しのため、GTCC以下	ベース	全地域：イニシャルおよびランニングコスト抑制による経済性(ライフサイクルコスト)最小化
	建設期間	○	蒸気タービン系無しのためGTCCより短工期	ベース	
	水消費	○	水回収により、補給水ゼロも可能	排熱回収ボイラのブロー水の補給	渇水地域：高効率発電プラントを導入により、環境保全、経済性向上

事業化戦略

●国内は、LNG火力リプレース、石油火力の燃料転換等のリプレース市場と、エネルギーセキュリティー確保を目的とした自治体、発電事業者のユーザーに導入提案する。

●海外は、欧米など再生可能エネルギーの導入が多い地域の他、立地の自由度のメリットを生かし、中東、西アジア、アフリカ等の内陸部、グリッド未整備地域を中心に導入提案する。

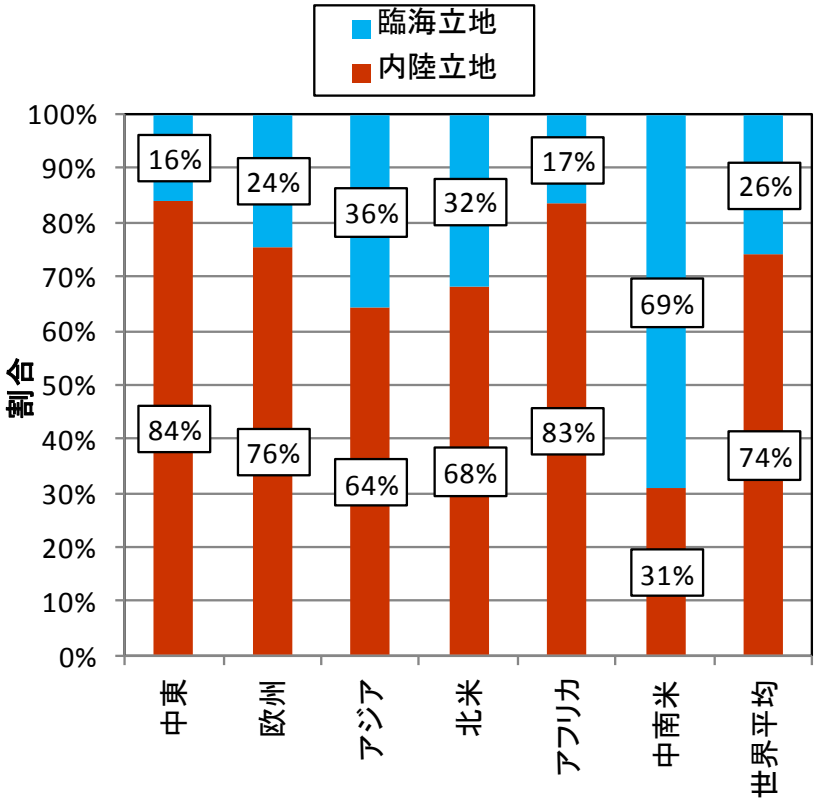


図　ガスタービン発電設備の地域別立地点
（2010年運開分、出典：日立製作所）

表　ターゲット市場と戦略

No.	市場	特徴	戦略
1	国内	・再生可能エネルギーとの連携ニーズ大 ・震災以降、エネルギーセキュリティー確保を目的とした分散電源のニーズ	・LNG火力リプレース、石油火力の燃料転換などのリプレース市場のユーザーに提案する ・内陸立地の分散電源の案件を狙う
2	欧米	再生可能エネルギーとの連携ニーズ大	起動時間、負荷変化率のメリット生かし再生可能エネルギーとの連携向けを狙う
3	中国、東南アジア	・中国の内陸部の発展 ・高気温	・内陸立地の分散電源の案件を狙う ・高気温地域に、出力低下が少ない点をアピールする
4	中東、西アジア、アフリカ	・高気温 ・水が乏しい ・グリッド未整備地域多い	・高気温地域に、出力低下が少ない点をアピールする ・水が乏しい地域に、補給水が少ないまたは不要な点をアピールする ・グリッド未整備の内陸立地の分散電源の案件を狙う

6. 研究開発マネジメント・体制等

プロジェクト遂行スケジュール

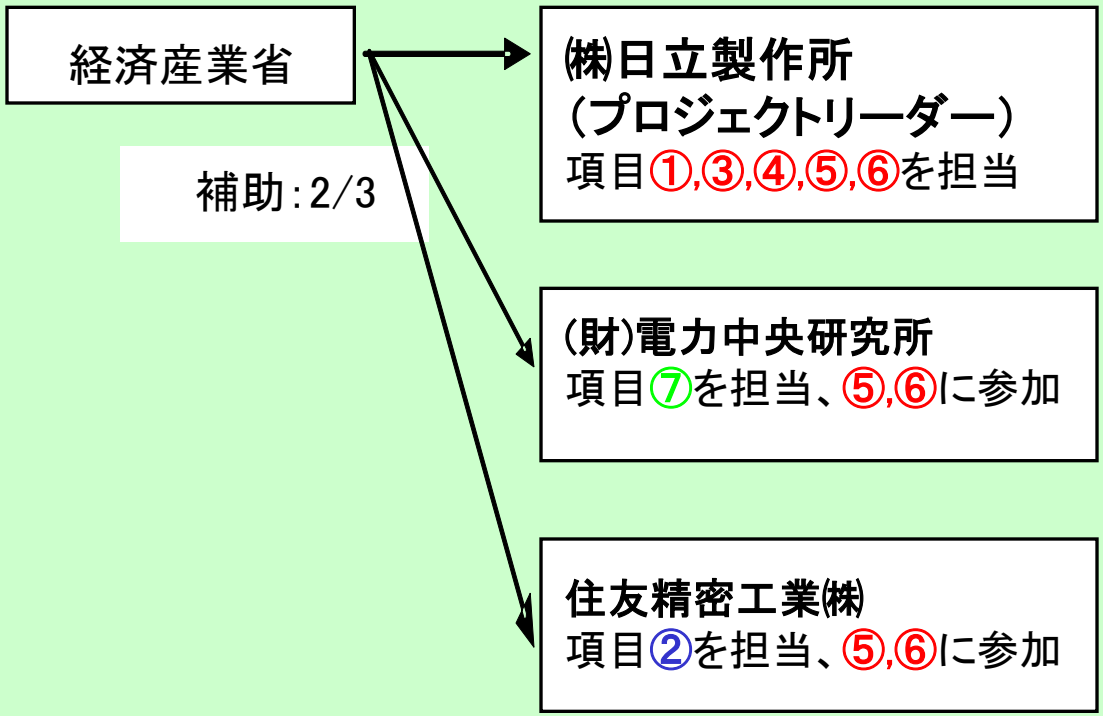
各項目とも当初の目的を完遂した。

計画
実績

	項目（主担当）	平成20年度	平成21年度	平成22年度	平成23年度
技術開発要素	①高湿分圧縮機（日立）	評価モデル高度化、微粒化技術			総合試験評価
	②高湿分再生熱交換器（住友精密）	材料試験・小型試験、コアの大型化			総合試験評価
	③高湿分多缶燃焼器（日立）	バーナー要素試験・単缶燃焼試験			総合試験評価
	④高湿分翼冷却（日立）	ハイブリッド冷却翼、高性能冷却試験		中間評価	総合試験評価
試験	⑤３MW級検証機（日立、住友精密、電中研）	試験			
	⑥実用化技術総合試験（日立、住友精密、電中研）	設計		製作	総合試験
解析	⑦ＡＴＡＨ特性解析（電中研）	３MW級検証機評価		他システム評価	総合試験評価
予算（補助金ベース、百万円）		216	1085	2465	1032

6. 研究開発マネジメント・体制等

本事業は、㈱日立製作所、(財)電力中央研究所、住友精密工業㈱の3社で実施しており、プロジェクトリーダーを㈱日立製作所に設置している。(財)電力中央研究所はユーザーの視点に立ったシステム評価としてAHAT特性解析を担当、住友精密工業㈱は高湿分再生熱交換器を担当し、実施者の専門技術を最大に発揮できる3社連携の協力体制で実施している。



実施項目
① 高湿分圧縮機
② 高湿分再生熱交換器
③ 高湿分多缶燃焼器
④ 高湿分冷却翼
⑤ 3MW級検証機
⑥ 実用化技術総合試験
⑦ AHAT特性解析

7．中間評価の結果

No.	事業評価報告書(平成２３年３月、産構審評価小委員会（第34回）)における提言、指摘事項	対応方針、対応状況
1	高湿分空気利用ガスタービン実用化技術は商用機規模での実証試験の前フェーズであり、説得力を持って実証試験につなげるためにも今後計画されている1/3スケールの実用化技術総合試験で長期信頼性、効率、経済性などをしっかり確認していただきたい。	●実用化技術開発の期間中は、平成24年1月～3月に40MW級総合試験装置の運転により性能確認した。 ●平成24年度からの技術実証事業でも、40MW級総合試験装置での試験を4年間の計画で実施中である。
2	また、研究開発体制について、大学のポテンシャルを有効活用し、産学官で事業に取り組むことにより国際性のある人材の育成にも貢献できるため、より一層の体制の構築に努めていただきたい。	●実用化技術開発の期間中の平成24年3月までに、大学との共同研究の内容、体制を検討した。 ●平成24年度からの技術実証事業で、複数の大学との共同研究を開始した。

高効率ガスタービン実証事業（1700℃級ガスタービン）の概要について

（H24年度～H32年度事業）

平成25年11月13日

資源エネルギー庁電力基盤整備課

三菱重工業株式会社

目　次

１．プロジェクトの概要

２．目的・政策的位置付け

３．目標

４．成果、目標の達成度

５．事業化、波及効果

６．研究開発マネジメント体制

７．事前評価の結果

1．プロジェクトの概要

概　　要	電力産業の保守高度化とリプレース需要にあった大容量機の高効率化を目指し、目標コンバインド効率57%以上を達成するために必要な、1700℃級ガスタービンの実用化を図る。 そのため、1700℃級ガスタービンの実用化に必要な要素技術開発と実証機の開発・製作・実証運転を行う。
実施期間	平成24年度～平成32年度　（9年間） 4年間：要素技術開発（事前技術検証） 5年間：実証機の開発・製作・実証運転 （4年間終了後、事業の見直しを行うことになっている。）
予算総額	140.5億円 (補助率3分の2)
実 施 者	三菱重工業株式会社
プロジェクトリーダー	伊藤　栄作　　三菱重工業株式会社　（主席研究員）

2. 目的・政策的位置付け

- 世界の温室効果ガスの排出を2050年までに半減するという長期目標を達成するため、革新的な技術開発の重要性が掲げられており、その中で、天然ガス利用の高度化として高温ガスタービンを用いた高効率火力発電技術の実用化を目指す事が定められている。
- 経済産業省は、「Cool Earth－エネルギー革新技術計画」を設定（平成20年3月5日）し、その中で「高効率天然ガス火力発電」が含まれており、着実な技術開発が必要である。
- エネルギー基本計画(平成22年6月18日閣議決定)において、「その他の火力発電については、新増設・更新の際には、原則としてその時点における最先端の効率を有する設備の導入を目指す。」と謳われており、1700℃級ガスタービンに代表される超高温高効率ガスタービンは、現状最も高効率の火力発電技術として、リプレースにおける大容量機のエネルギー効率向上に寄与できる技術である。
- 「日本再興戦略 -JAPAN is BACK-」（平成25 年6月14 日閣議決定）において、LNG 火力について、2020 年頃までに1700 度級ガスタービンの実用化を目指す（発電効率：現状52%程度→改善後57%程度）と明記されている。
- 総合科学技術会議の環境エネルギー技術革新計画（平成25年9月13日閣議決定 ）において、高効率天然ガス発電技術のロードマップが示されており、この中でも2020年をターゲットに、57%の発電効率を目指すことが記載されている。

「環境エネルギー技術革新計画」（平成25年9月13日）技術ロードマップ

2. 高効率天然ガス発電

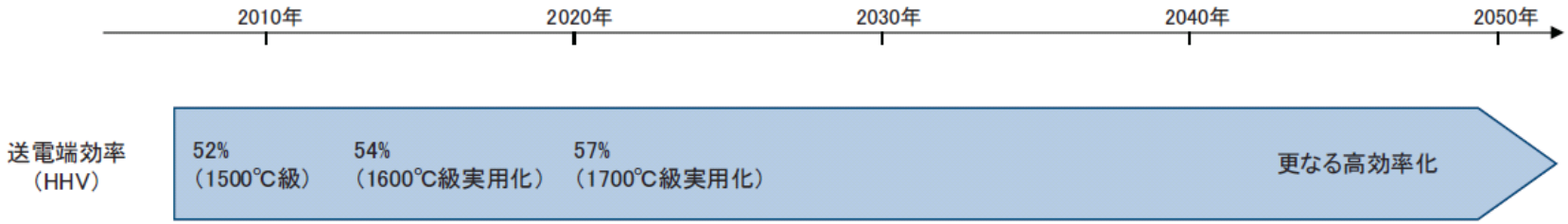
技術の概要

○高効率天然ガス発電技術としては、ガスタービン及び蒸気タービン複合発電技術や、開発中の高湿分空気利用ガスタービン技術（AHAT）がある。
○我が国では1600℃級のガスタービンの開発が完了し、2013年10月より関西電力の姫路第二発電所にて営業運転を開始予定（発電効率54%、送電端・HHV）。
○将来CCSが商用化し、導入されれば、二酸化炭素排出をほぼゼロにすることが可能。
○IEA はEnergy Technology Perspectives2010の(世界のエネルギー起源CO_2の排出量を2050年に2005年比で半減させる)ブルーシナリオにおいて、天然ガス火力発電で2.8億トン程度のポテンシャルがあると試算。

我が国の技術開発の動向・課題

○我が国は、コンバインドサイクル発電に関して、2013年頃に1600℃級で54%、2020年頃には1700℃級で57%の発電効率（送電端・HHV）を達成することを目指している。また、トリプルコンバインドサイクル発電システムについて、要素技術開発を実施している。
○AHATについては、2020年頃までに10万kW級で51%（送電端・HHV）の発電効率を実現することを目標としている。
○1700℃級ガスタービンの開発では、超高耐熱合金をはじめとする高温耐熱性タービンの開発等が主要な課題となっている。この課題を解決し、現状最大52%の発電効率（送電端・HHV）を57%（2020年頃）まで上げることが目標。
○AHATについては、高効率圧縮機設計技術やタービン翼冷却技術の開発が必要である。

技術ロードマップ



○ガスタービン技術は、空力、熱力、燃焼、材料等の広範囲で高度な設計技術・製造技術を有することから、産学官の連携の下、技術開発を進めることが重要（大学等における材料や触媒技術等の基礎研究と、民間主体のプラントをシステムとして実証する大型プロジェクトの連携を強化）
○幅広い人材の育成による技術開発の推進

国際動向

普及の現状
○米国では、2013年にフロリダ州において、発電効率（送電端・HHV）が約54%となる高効率ガスタービンの営業運転が開始される予定。

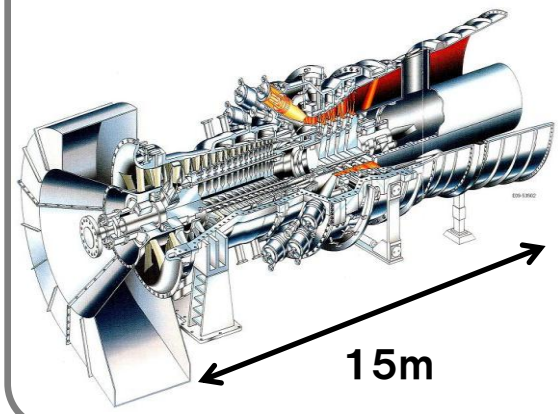
技術開発の動向
○米国エネルギー省(DOE)の国家プロジェクトでは、ガスタービンメーカーや大学に2003年から2015年にかけて約1,000億円を投資して、高効率化を目指している。
○欧州では、CAME-GTと呼ばれるイニシアチブの中で高効率ガスタービンの開発が推進され、現在は第7次研究枠組計画（FP7）の中で個別の技術要素の改良に向けた研究開発が実施されている。

我が国の国際競争力
○我が国では、入口ガス温度を1600℃まで高め世界最高水準の発電効率（送電端・HHV）54%を実現した「1600℃級複合発電」が2013年10月頃に営業運転が開始される予定であり、我が国の技術開発レベルは世界最高水準にある。
○ガスタービンの高温化はスピードが非常に速く、1980年代初頭の複合発電システムの導入以降、年間約20℃という早いペースで燃焼温度の高温化が進み、熱効率が改善してきた。熾烈な開発競争の中、高温化に対して技術的に開発が可能な国は、米・独・日の 3 カ国に絞られつつある。

ガスタービンの特徴

高度な技術が必要で、国際競争が激化

作動原理と特徴　コンパクト&大出力



- 圧縮機
  空気を吸い込み、圧縮
- 燃焼器
  超高温・高エネルギーの燃焼ガスを作る
- タービン
  回転エネルギーに変換

高度な技術が必要

- 超高温
  1600-1700℃
  超合金の融点　約1350℃
- 超高速
  500m/s以上の回転速度
  ⇒10,000Gを超える遠心力
- 長時間運用
  1年以上の連続運用も可能

超高効率ｶﾞｽﾀｰﾋﾞﾝの特長

- 火力発電の中で最も高効率
  熱効率　＞60%　　Cf　石炭火力 約 45%
- 低エミッション
  CO2< 0.31kg/kwWh　Cf　石炭火力の1/2.5
- フレキシブルな運用が可能
  自然エネルギーの発電量の変動を補完
- 多様な燃料を使用可能
- 技術展開のバリエーションが豊富
  IGCCなど、

技術の波及効果が大きい

- 市場規模が大きい　2-3兆円
- 産業の裾野が広く、雇用に貢献
- 技術開発が、市場シェアに直結する。

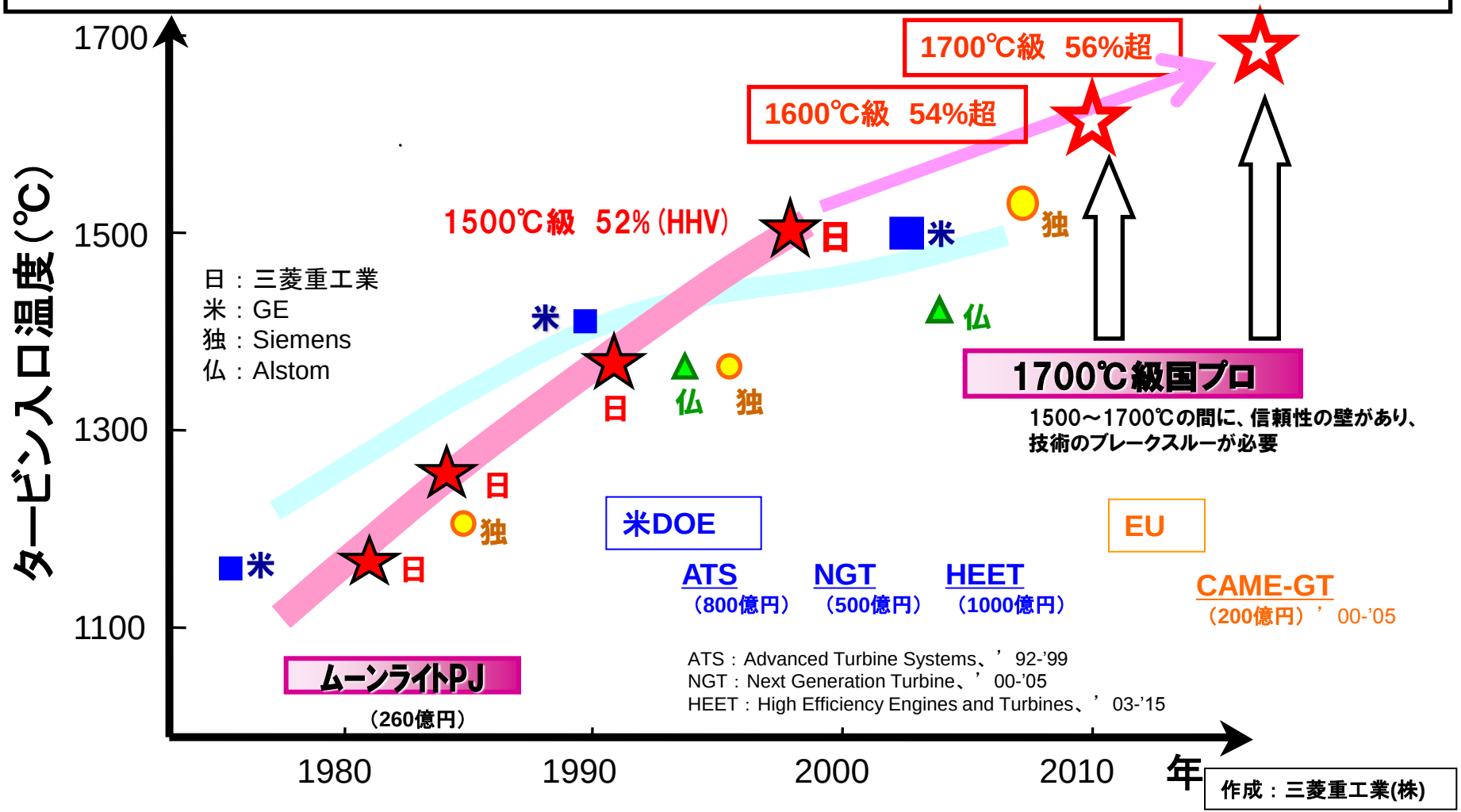
過酷な国際競争

- 各国のフラッグシップ技術
  科学技術分野で、航空宇宙技術と並ぶ重要技術
- 各国の経済/エネルギー政策の重要技術

欧米各国との競争

欧米vs日本　ガスタービンの高温化（高性能化）競争で優位性を維持

- わが国は、世界に先駆けて1500℃級を実用化し、本分野をリードしている。
- 欧米は巨額の研究開発費を投じており、日本は手を緩めるとすぐに競争力を失う。
- 優位性を維持するため、1700℃級に必要な革新的技術開発に取り組み、早期に実用化する事が必要である。



国の関与の必要性

火力発電の高効率化のためには、革新的な技術開発が必要だが、

- 研究開発成果の商業性や投資回収可能性に係るリスクが大きく、民間企業だけでは対応できない研究開発分野である。
- 実用化まで長期のリードタイムと多大な研究開発投資を必要とする技術開発を推進するには、官民がその方向性を共有する事が不可欠である。

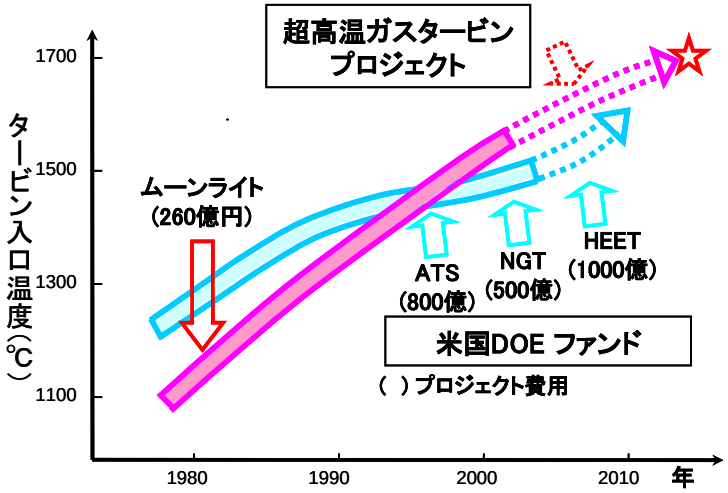
●大型ガスタービンの高温化は、日本が世界をリードしてきた。

●海外にも先例が無い。

ムーンライト
‘78～’87　260億の予算で実施。
●高温化技術の遅れを挽回した。
●開発技術を活用して、
’90　1350℃級　実用化
’97　1500℃級　実用化
以降高温化で世界をリード

したがって、未知の事象が想定され開発リスクが高い。

産学共同で、最新の基礎技術を投入しつつ進める為に、是非とも国の関与と支援が必要である。



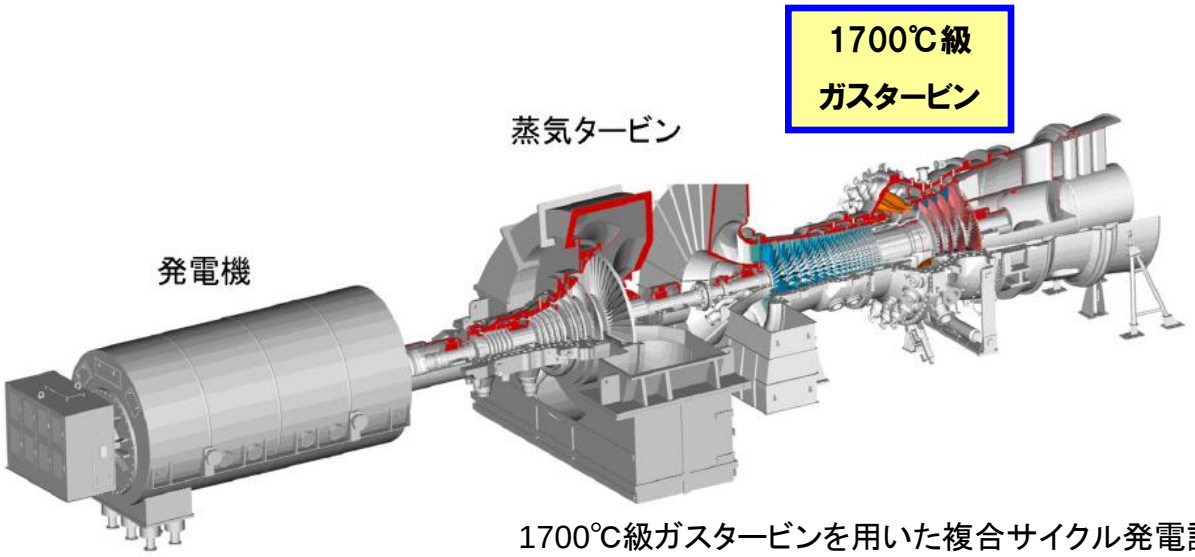
ガスタービンのタービン入口温度の上昇

施策の目的実現の見通し

高効率ガスタービンの実用化技術開発（1700℃級ガスタービン）

プロジェクトのアウトプット	カスタマー	直接アウトカム	中長期のアウトカム
プロジェクトの概要 1700℃級ガスタービン実現の為に必要となる実用化技術の開発。	より実機に近い条件下での各技術の実現性の評価	民間企業（電力会社及び重工メーカー）	燃焼器、タービン、圧縮機をモジュールレベルで検証	1700℃級ガスタービンの実現

効果が確認された要素技術を活用して、1600℃級ガスタービンを開発



1700℃級ガスタービンを用いた複合サイクル発電設備のイメージ

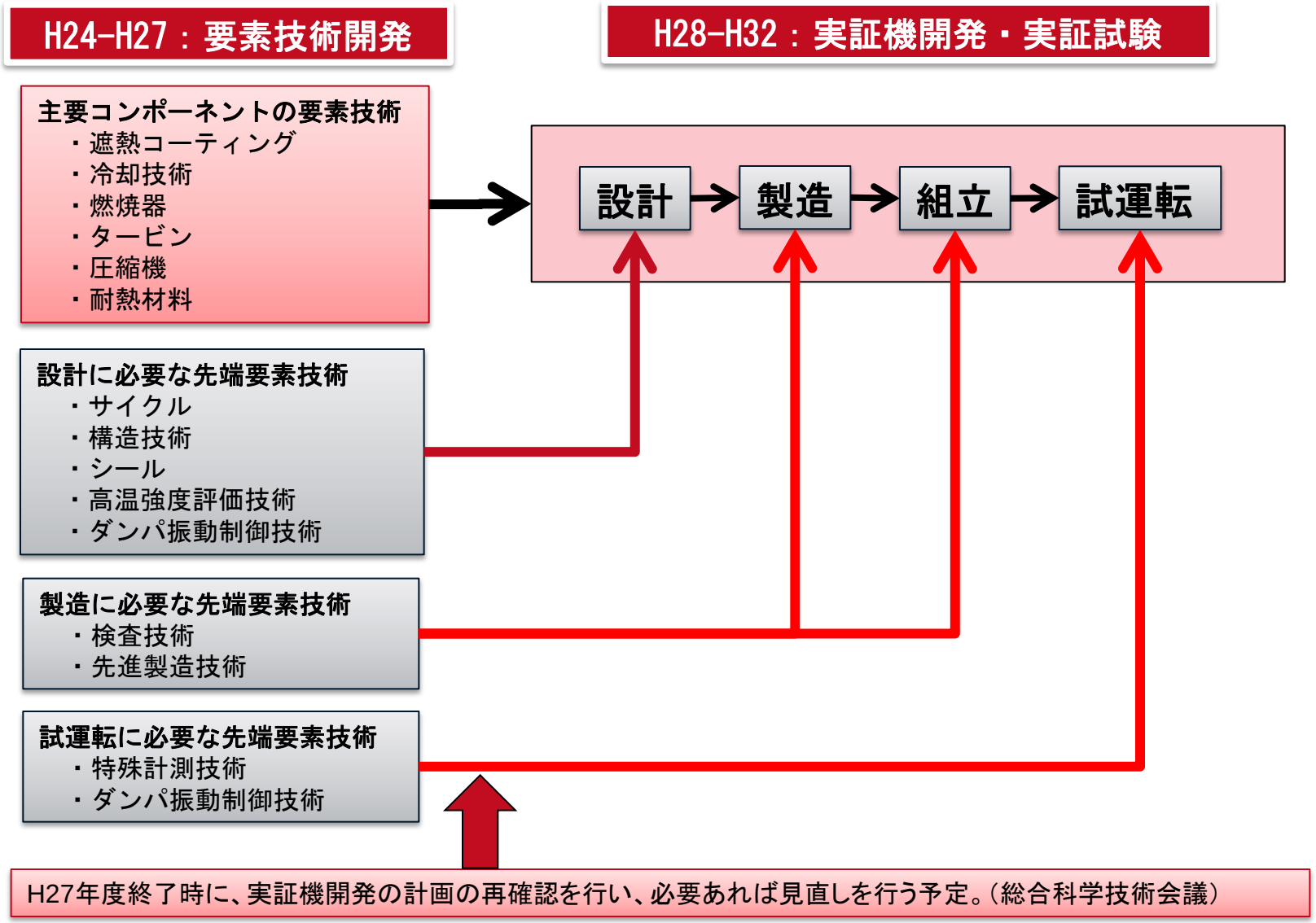
施策の構造
要素技術開発・実用化技術開発 （H16~H23年度)

送電端効率56%HHVを達成を目指し、燃焼温度を高めた1700℃級ガスタービンを実現するキー技術を開発する。

対象	技術分野	技術	事業	事業概要
【高温化】 ・1700℃に高め、熱効率向上 ・安定燃焼と低NOxの両立 ・高温化でのタービンの信頼性確保 ・冷却空気量の最小化 ・主要部品への入熱低減	燃焼	排ガス再循環システム／低NOx燃焼器	高効率ガスタービンの要素技術開発【H16-H19】	1700℃級ガスタービン実現の為に必要となる要素技術について、実験室レベルでデータ取得し、実現性の高い技術を絞り込み。
	伝熱	高性能冷却システム		
	遮熱コーティング	低熱伝導率TBC	高効率ガスタービンの実用化技術開発【H20-H23】	必要となる要素技術について、より実機に近い条件下で有効性を検証し、モジュールとして開発・検証。
【高負荷条件下での高性能化】 ・現状並みの軸長・段数で高信頼性確保 ・1段あたりの負荷が高い厳しい条件で、高性能を達成	空力	高負荷・高性能タービン		
		高圧力比高性能圧縮機		
【高温化】 ・1700℃作動に耐える超耐熱材	材料	超耐熱材料	超耐熱材料の開発（独立行政法人　物質・材料研究機構が担当）【H16-H22】	1700℃環境下で十分な耐久性を有する単結晶超合金を開発。

省庁間連携

施策の構造
実証事業　（H24~H32年度）



3. 目標

全体目標

コンバインド効率57%以上（送電端、HHV）を達成する。
1700℃級ガスタービンに適用可能な実用化技術を開発する。

目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
発電効率５７％（高位発熱量基準、送電端）	発電効率５７％（高位発熱量基準、送電端）を達成するために必要な、要素技術の開発目標に向けて、解析や要素試験により、各項目の達成目途を得る。 また、要素試験の実施仕様を明確にして、準備を進める。	2020年市場導入時に世界最高効率で、海外メーカーに確実に先行できる発電効率を目標とした。

個別要素技術の目標(1/3)

要素技術	目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
①低熱伝導率遮熱コーティング	遮熱性を+30%向上 （従来1600℃級）	・厚さ0.5mm以上 ・熱疲労寿命従来並 ・エロージョン試験着手	・超高温での遮熱性の大幅向上と、耐久性の両立。 膜厚　従来0.3mm→0.5mm以上 ・エロージョン/コロージョンの発生防止 従来比減耗量Δ50% ・大型3次元翼の高品質確保 ・航空用ＧＴの3倍の大型
②高性能冷却システム	冷却空気量Δ10% （従来1600℃級）	・燃焼器＋タービンの気流・伝熱試験 ・端壁面詳細データ	・冷却空気流量の大幅削減Δ10% ・ガス温度を約100℃ ・燃焼器下流の強い乱れ、表面近傍の高温ガス流れ 局所流速精度　±10%以内 熱伝達率精度　±30%以内 ・内部冷却流と、外部ガス流の連成効果 圧力予測精度　±10%以内
③非定常性制御燃焼技術	NOx 40ppm 排ガス再循環有り （従前目標50ppm） NOx 50ppm 排ガス再循環無し	・排ガス再循環有 NOx40ppm以下 ・内部データ把握 ・実機燃焼器形態の火炎形状の把握。 ・不安定領域を特定	・再循環を最小限（30%⇒0%）で、NO x 50ppm ・燃焼用空気温度従来450℃⇒500℃程度で燃料の自己着火や逆火などの発生防止。 ・燃焼振動の発生メカニズムの理解と発生防止 ・燃料多様化技術：燃料ノズルを開発する。
④超高性能タービン	一軸タービンで、効率92%以上 （従前目標91%）	・効率向上コンセプト ・排気損失Δ50%低減 ・励振力メカニズム解明	・超高温・高負荷条件での高効率の実現 ・排気損失低減：従来比Δ50% ・高温ガスの混入防止：シール空気　従来比Δ10% ・超高負荷での励振力低減：従来比Δ10%

個別要素技術の目標(2/3)

要素技術	目標・指標 （事後評価時点）	目標・指標 （中間評価時点）	設定理由・根拠等
⑤境界層制御高性能圧縮機	一軸圧縮機 圧力比約30 効率90%以上 （従前目標89%）	・前方段の負荷＋10% 段効率+1% ・中後方段クリアランスデータ取得 ・多段モデル圧縮機 試験装置計画	・発電用一軸15段程度で、圧力比約30を実現 ・境界層コントロール ・3次元翼形状を開発 効率　90%以上 ・一軸・高圧力比圧縮機の安定な起動特性の確保
⑥超高性能サイクル	発電効率57%HHV,送電端）を達成可能なシステム構成 （従前目標56%）	・発電効率57%を実現するための、エクセルギ分析・評価	・エクセルギ分析による効率最大化 ・高性能サイクル最適化 ・現状世界最高の1600℃級のデータを活用
⑦高機能構造技術	クリアランス周方向偏差1.0mm以下	・構造コンセプト ・1600℃級でのクリアランスデータ取得準備	・直径４ｍ以上の半割れ構造車室 ・周方向隙間偏差1.0mm以下
⑧高性能シール	・従来もれ量1/3 ・シール空気量 10%低減	リーフシール基礎データ取得	・大変形追従型高性能シールの開発
⑨先進製造技術	・長穴加工L/D>250 （従前L/D>200） ・孔位置誤差1.0mm ・溶接変形　Δ50% ・鋳造歩留り>90%	・長穴加工L/D>250 ・溶接変形の20%以上低減 ・高強度の中子・鋳型の候補材抽出	・タービン長翼の細部を冷却する長穴加工技術 ・溶接時の変形低減　Δ50% ・精密鋳造技術の品質確保 ・大型精密鋳造翼の形状精度確保、鋳型強度向上

個別要素技術の目標(3/3)

要素技術	目標・指標（事後評価時点）	目標・指標（中間評価時点）	設定理由・根拠等
⑩超高温強度評価技術	方向凝固翼の強度評価手法の構築	・高温域設計材料データ ・超高温域長時間使用後の材料データ取得	・方向凝固翼の強度評価技術確立 ・クリティカル部位の高温強度評価技術
⑪特殊計測技術	高温部計測センサーの耐用時間100hr以上	・高温での動翼振動計測の開発と実機計測 ・高温での動翼チップクリアランス計測準備	・特殊計測用センサーの開発 ・燃焼ガス温度計測 ・タービン表面メタル温度計測 ・クリアランス計測 ・動翼振動計測
⑫高精度・高機能検査技術	翼内面の複雑形状部の欠陥検知0.5mm以下	・センサ試作 ・0.5mmのき裂検知	・翼内面の欠陥検知技術 従来1.0mm→0.5mm
⑬高性能ダンパ振動制御技術	翼振動数のバラツキ50%低減	・ダンパの基礎データを取得	・バラツキの小さいダンパ技術 ・確実な共振回避とダンピング確保

4. 成果、目標の達成度(1/2)

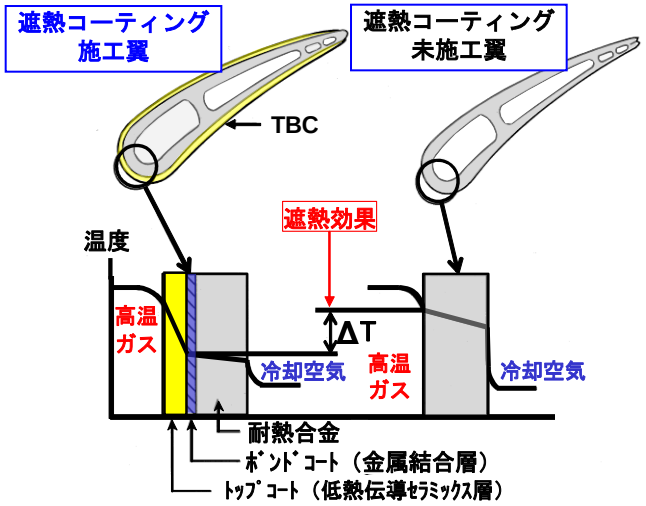
要素技術	目標・指標　（中間評価時点）	成果　（中間評価時点）	達成度
①低熱伝導率遮熱コーティング	・厚さ0.5mm以上 ・熱疲労寿命が従来並み ・エロージョン試験装置製作および試験着手。	・**厚さ0.5mm以上**の成膜条件で、**熱疲労寿命が従来並み**であることを確認した。 ・**エロージョン試験装置を製作し、試験に着手**した。	達成
②高性能冷却システム	・実機燃焼器＋タービン翼列の気流・伝熱試験による端壁面での詳細データ取得。	・タービン翼列の気流試験・伝熱試験による**端壁面での詳細データを取得**した。	達成
③非定常性制御燃焼技術	・排ガス再循環有、NOx　40ppm以下を確認する。 ・燃焼器内気流データの取得。. ・実機燃焼器形態での火炎形状の把握。 ・燃焼を不安定にする領域を特定する。	・**排ガス再循環有、NOx　16ppm**を確認した。 ・燃焼器内気流データを取得した。 ・実機燃焼器形態での火炎形状を計測した。 ・**燃焼を不安定にする領域を特定**した。	達成
④超高性能タービン	・タービン効率向上コンセプトの抽出 ・排気ディフューザの改良を行い、圧力損失５０%低減 ・励振力発生のメカニズムの考察・解明	・タービン効率向上コンセプトを抽出し、**試設計とシミュレーションで妥当性を確認**した ・**排気５０%圧力損失低減を確認**した。 ・**励振力データを取得し現象のメカニズムを考察・解明**した。	達成
⑤境界層制御高性能圧縮機	・前方段の負荷を＋10%高めた条件で、段効率+1%向上 ・中後方段に対し、多段条件での動翼チップクリアランス流れデータを取得。 ・多段モデル圧縮機試験装置の計画	・**前方段の負荷を約10%高め、段効率+1%向上**を確認した。 ・多段条件での動翼チップクリアランス流れ**データを取得**。 ・多段モデル圧縮機試験装置の計画、一部**製造に着手**した。	達成

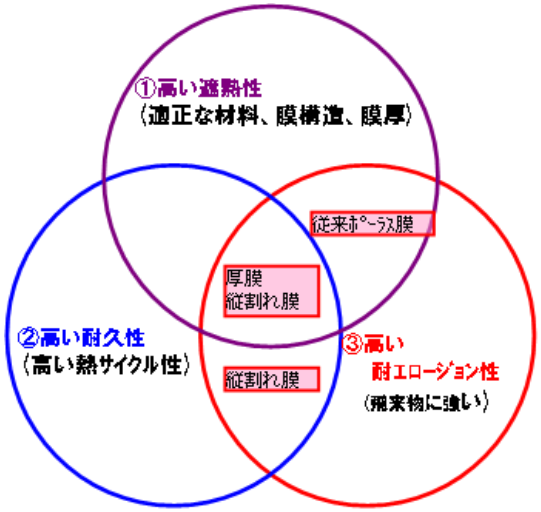
4. 成果、目標の達成度(2/2)

要素技術	目標・指標　（中間評価時点）	成果　（中間評価時点）	達成度
⑥超高性能サイクル	・エクセルギ分析・評価	・**発電効率57%以上の達成目途**。 ・**エクセルギ損失の発生部位を定量評価**した。	達成
⑦高機能構造技術	・各種構造コンセプトの比較検討 ・1600℃級でクリアランスデータの取得準備	・構造コンセプトを考案し、比較検討を実施。 ・データ取得準備完了。**11月に計測予定。**	達成
⑧高性能シール	・リーフシール基礎試験装置の製作とデータ取得	・リーフシールの**基礎データを取得**した。	達成
⑨先進製造技術	・長穴加工L/D>250 ・溶接変形の20%以上低減 ・高強度の中子・鋳型の候補材抽出	・長穴加工を実施し、**L/D＞250を達成**した。 ・レーザー溶接工法最適化で、**変形を20%低減目途を得た。** ・鋳型原料・スラリー条件を決定し、**候補材を抽出した。**	達成
⑩超高温強度評価技術	・高温域での設計に向けた材料データ取得 ・超高温域長時間使用後データ取得に着手	・高温域での**材料データを取得した。** ・試験に着手。5000hr後のデータは**H25年度末に完了予定**。	達成
⑪特殊計測技術	・高温での動翼振動計測技術（非接触）の開発と計測実施 ・高温での動翼チップクリアランス計測準備	・実機ガスタービンで、**翼振動データを取得した。** ・チップクリアランスセンサーを開発、**11月に計測予定**	達成
⑫検査技術	・直径φ0.7mmのき裂検知極小センサの試作 ・試計測の実施により、検知精度0.5mm	・直径φ0.7mmの極小ファーバースコープセンサーを試作。 ・**0.5mmのき裂検知の目途を得た。**	達成
⑬ダンパ振動制御技術	・振動数やダンピングの基礎データ取得	・**基礎データを取得し改良ダンパの検討に着手**した。	達成

① 熱伝導率遮熱コーティング

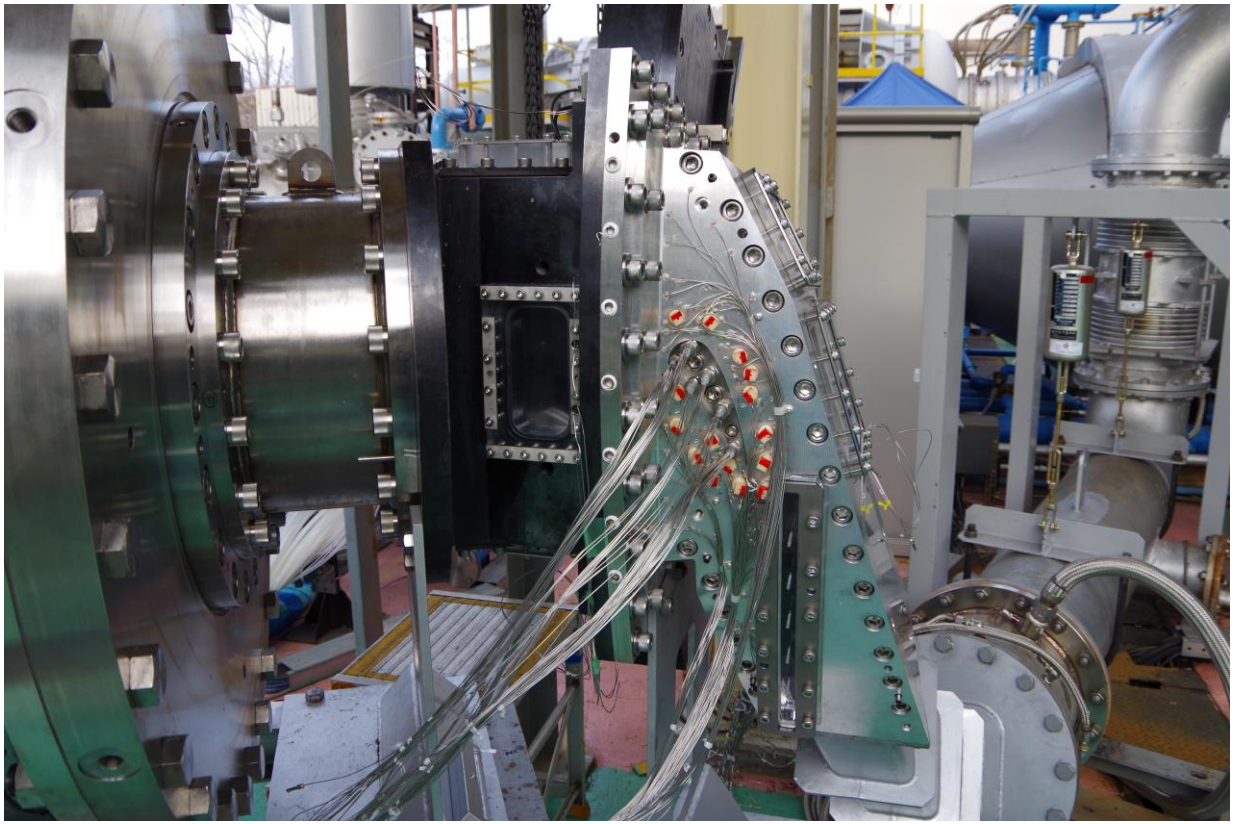
・遮熱コーティング厚0.3mm（従来）⇒0.5mm以上と厚膜としつつ、熱疲労寿命は従来並みを狙う。
・発電用ガスタービン特有のエロージョン/コロージョンに対し、耐久性向上（従来比減耗量Δ50%）を実現するために、より緻密な組織を実現するための溶射条件を検討中である。
・シミュレーションが難しい技術分野であり、基礎データ取得のため、高温高速エロージョン試験装置を新たに開発・製作した。





② 高性能冷却システム

・実機燃焼器を上流に設置した状態でのタービン翼列の気流・伝熱試験を実施し、シュラウド面（端壁面）での詳細データを取得した。
・特に壁近傍で渦や乱れの強い領域での境界層（壁面からの距離が2-3㎜以内の領域の流れ）を詳細計測し、捩れ境界層が熱伝達率に与える影響を、微視的に調査検討した。



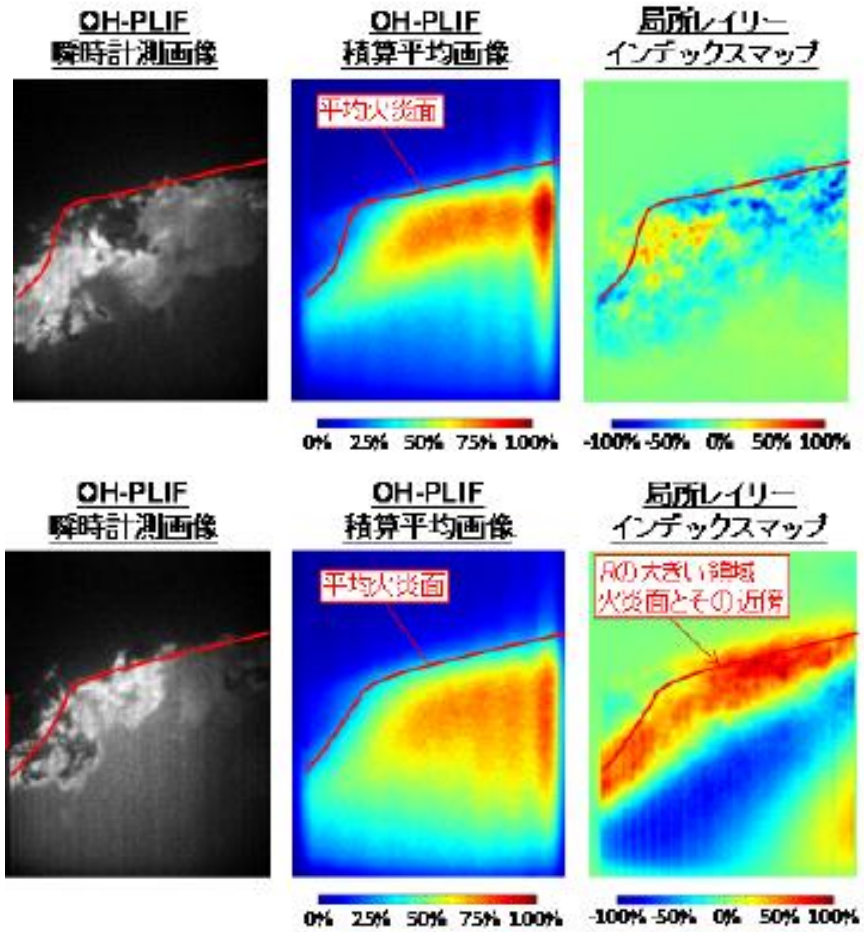
③ 非定常性制御燃焼技術

・燃料が燃焼反応する際に生じるＯＨラジカルをレーザーを用いて計測した。これを計測することにより、燃焼領域を特定することができる。この手法を用いて、実機燃焼器形態での火炎形状（時々刻々変化している火炎形状の瞬時の形状）を計測・把握した。
・火炎形状と圧力変動を同時計測し、両者の変動の位相関係を分析することにより、燃焼を不安定にする領域を特定した。

実燃焼器でのレーザーによる火炎計測

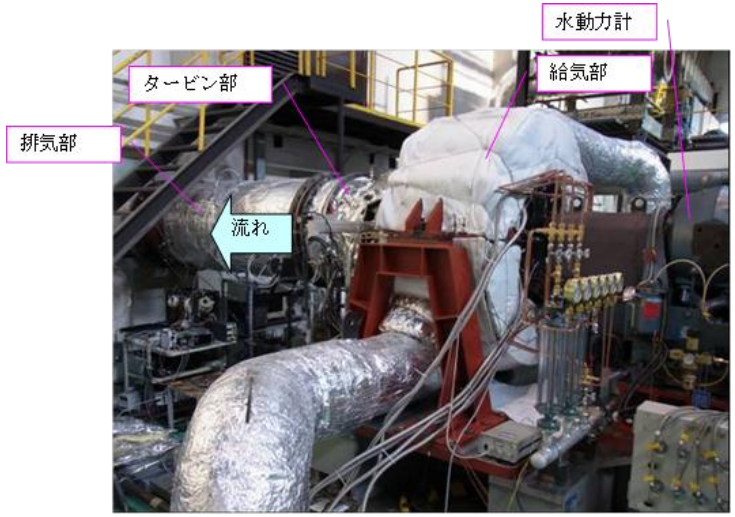
上：安定燃焼時

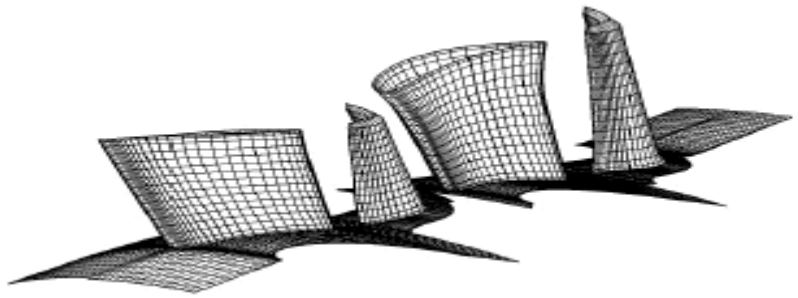
下：燃焼振動発生時
（不安定燃焼時）
右の赤い部分が
不安定燃焼領域

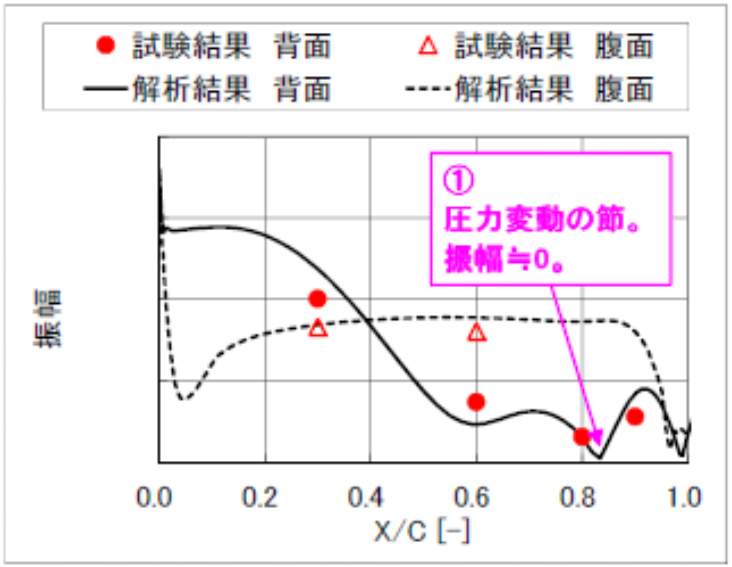


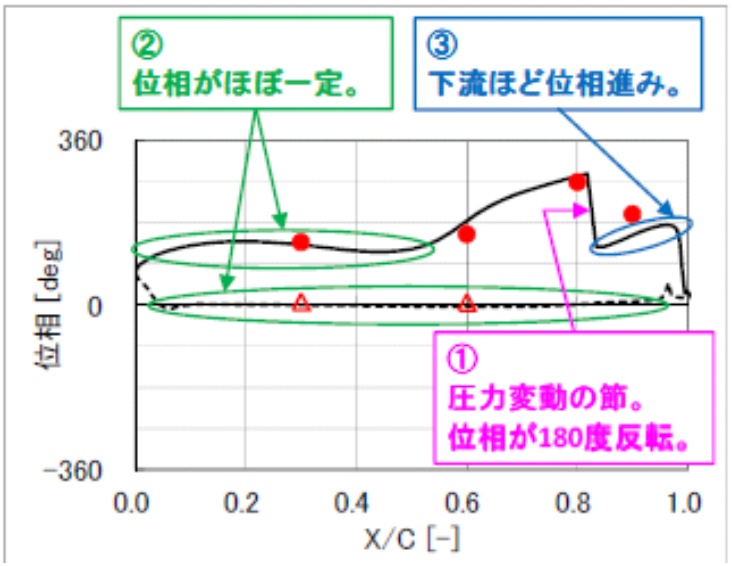
④ 超高性能タービン

・回転している動翼の翼面上の圧力変動を詳細計測し、動翼−静翼間の翼列干渉効果により生じる動翼の励振力（動翼に加わる加振力）の発生メカニズムを考察・評価した。







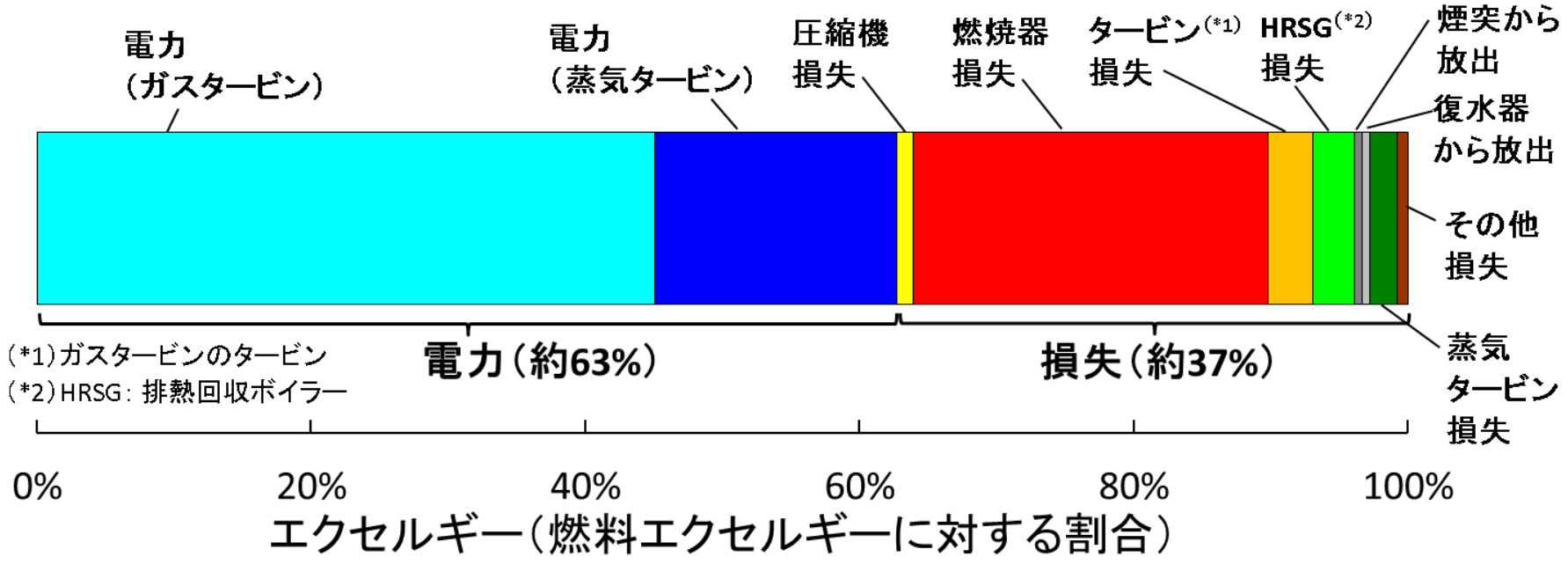


⑤ 境界層制御高性能圧縮機

・高速回転試験装置を用いた前方段モデル圧縮機試験により、設計点での段圧力比を約10%高くし、スパン方向の圧力比の分布をよりフラットにすることにより、1%以上の段効率向上の目途を得た。

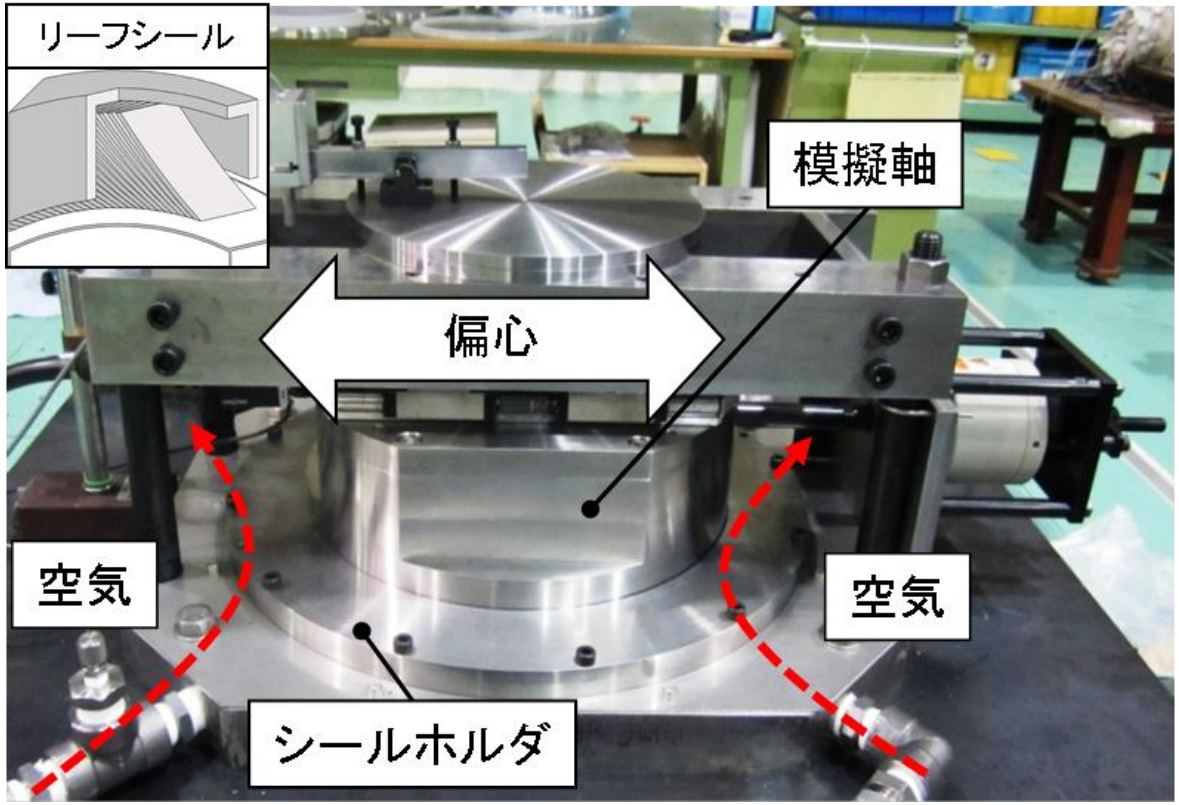
⑥ 超高性能サイクル

エクセルギ理論を活用し、プラントの各コンポーネントにおけるエクセルギー損失を定量評価した。損失低減策を検討し、プラント構成や圧力・温度などの条件を最適化することにより、効率の最大化を図る。



⑧　高性能シール

・回転系部品（ロータなど）と静止系部品（翼環やケーシングなど）との隙間（クリアランス）は、高温作動時に熱変形などにより数ｍｍ～１０ｍｍ以上も変形し、漏れ空気が大きくなってしまう。
・このため、両者の大変形に追従する高性能シールとして、リーフシール（金属の薄板を多層に重ねた高性能シール）の開発のために、以下の試験装置を製作し、試験実施中である。

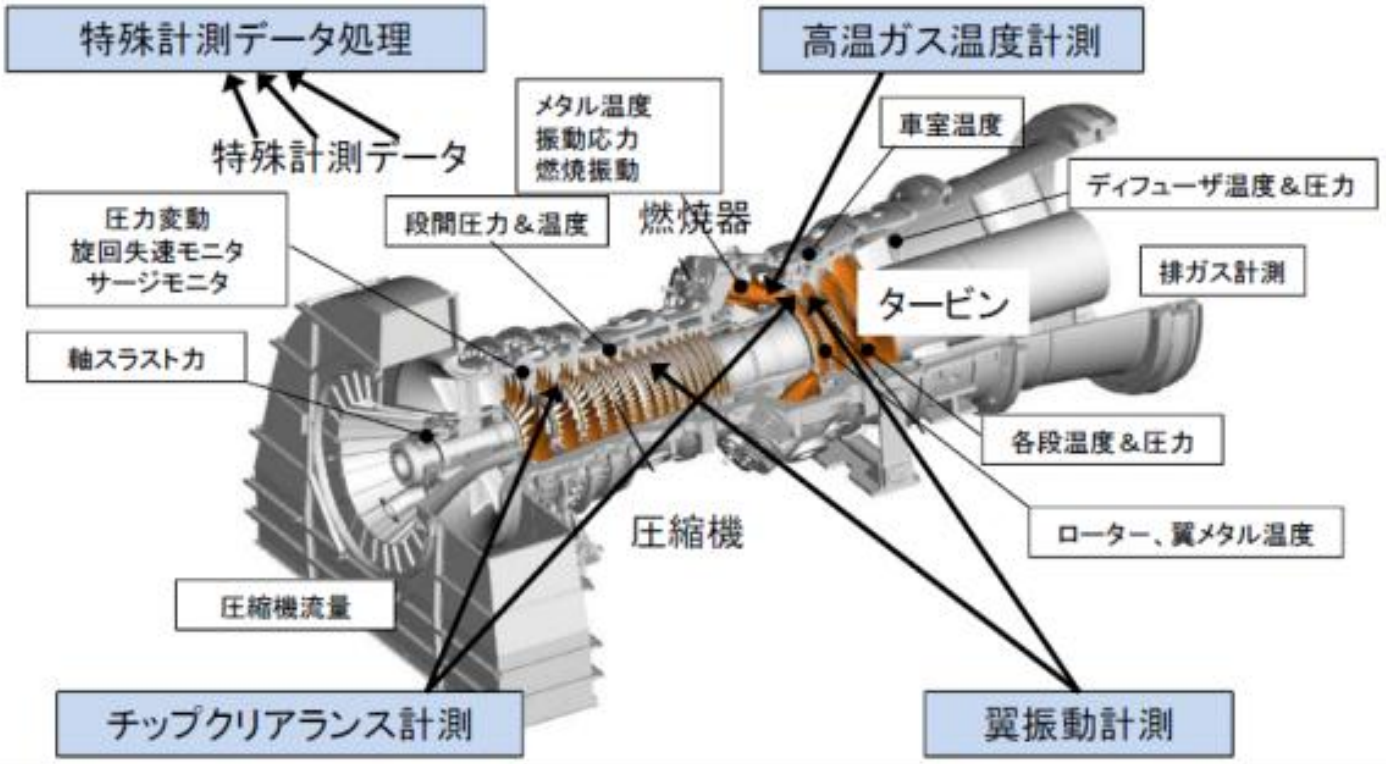


⑪　特殊計測技術

・1700℃級の超高温条件では、試運転時に必要不可欠な計測項目
　・燃焼ガス温度
　・タービン翼の表面メタル温度
　・回転動翼と静止しているケーシングとの隙間（チップクリアランス）
　・回転動翼の振動

に対して、従来の計測技術やセンサーでは、耐久性などが問題となり正確なデータを計測することが困難となる。

・これらに対し、実機で使用可能とするための技術開発として、センサの開発や計測技術の改良などを行う。



5. 事業化、波及効果

（市場規模）

・日本、米国、アジアを中心に、1500℃級→1600℃級へ主力機が移行。

・引き続き、**超高性能機へ市場が移行していくことは確実**。

・先進国および途上国のいずれも、電力需要が伸びており、引き続き、ガスタービンの**市場規模は40GWレベルで拡大傾向**である。

（経済性）

・ガス価格が高い場合は、**500MWの発電設備を年間8000hr運用すると、発電効率を52%→57%に高めることにより、年間39億円程度の燃料代の節約**。

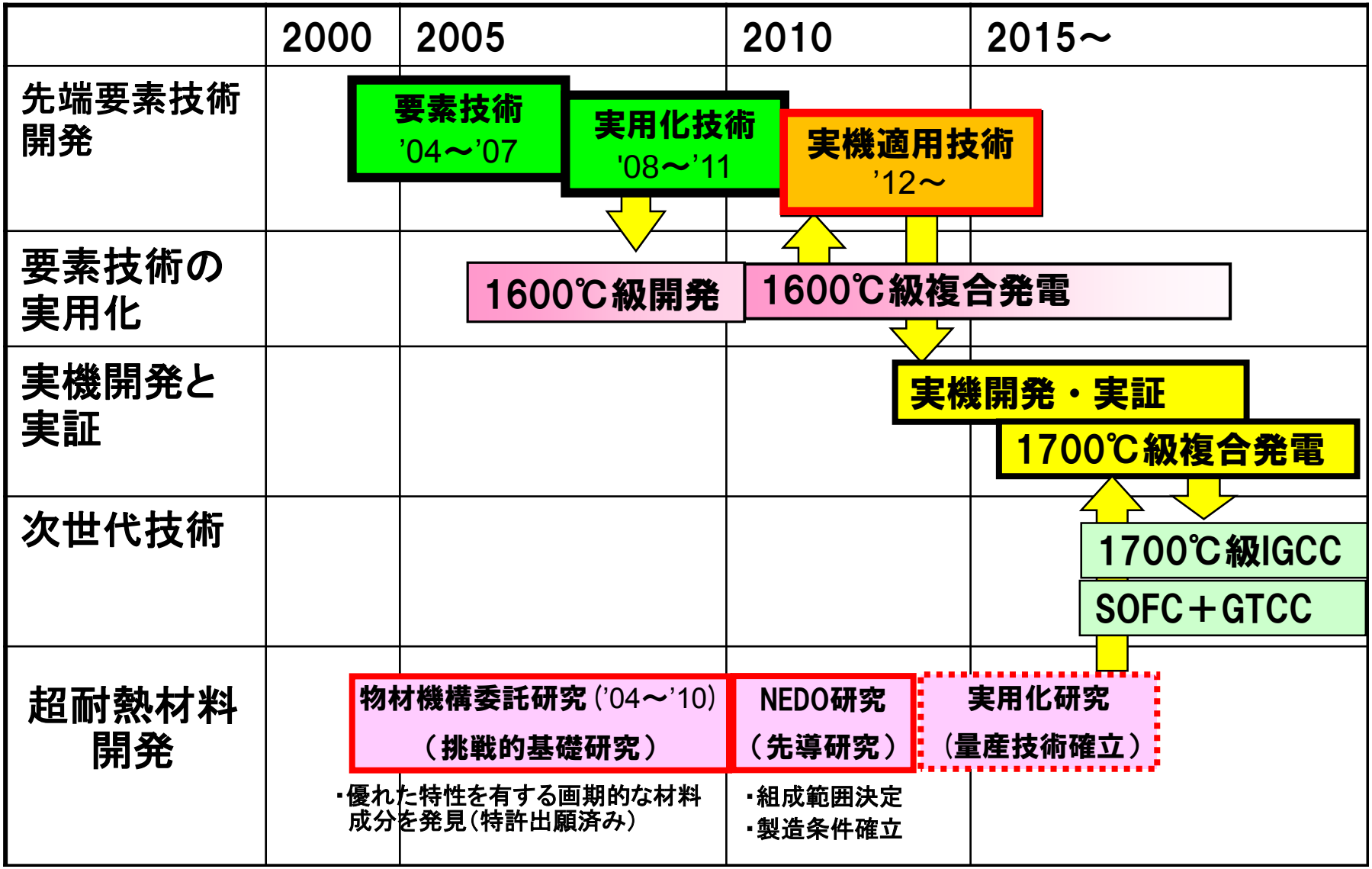
表：発電効率を５２%⇒５７%とした場合の年間の燃料代の差

燃料価格	発電効率　５２%	発電効率　５７%	燃料代の差
１７$／MMBｔｕ	４４７億円	４０８億円	Δ３９億円
１０$／MMBｔｕ	２６３億円	２４０億円	Δ２３億円

（波及効果）

高効率高温ガスタービンは、石炭ガス化発電IGCCの主機の一つとして、適用可能である。1700℃級のIGCCが実現すれば、燃料の多様化によるエネルギーセキュリティー上のメリットに加え、発生CO2量の大幅な削減が期待できる。

実用化までの技術開発ロードマップ（1,700℃級ガスタービン）



費用対効果･変化への対応等

（CO2削減効果と省エネ効果）

既存の老朽火力発電所の約50%を1700℃級ガスタービンコンバインドサイクルに置き換えた場合の**CO2低減効果は6700万ton/年（日本全体のCO2排出量の約５%に相当）、省エネ効果は原油換算で2200万トン**と莫大な量と成る。

（LNG輸入額増大への対応）

ガス価格が高い場合（17$/MMBtu程度）は、500MWの発電設備を年間8000hr運用する場合を想定すると、発電効率を52%→57%に高めることにより、年間39億円程度の燃料代の節約となる。

（震災への対応）

大型ガスタービンでも全長は約１５m程度であり、工場で組立てた後、輸送し現地に設置することができる。従って、**工期がわずか数か月で発電を始めることも可能**となる。

蒸気が要らない「空冷燃焼器」も視野に入れた開発を行うこととした。

（自然エネルギー普及に伴う負荷変動への対応）

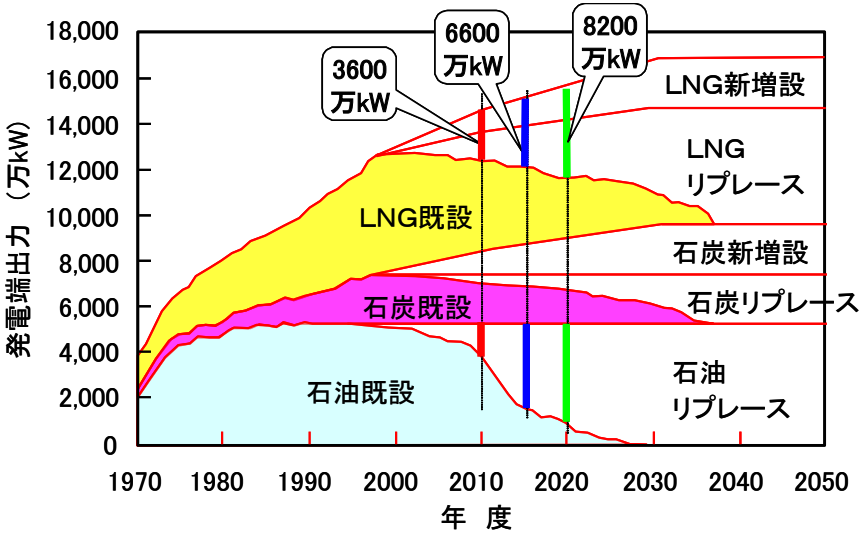
1分間で発電量を約50MW増減させることができる。この「高い負荷変動吸収能力」により、発電量の変動を広域でカバーし、再生可能エネルギーの普及を促進する。

このように運用性として、急速起動や負荷変化能力も考慮して構造検討を実施する。

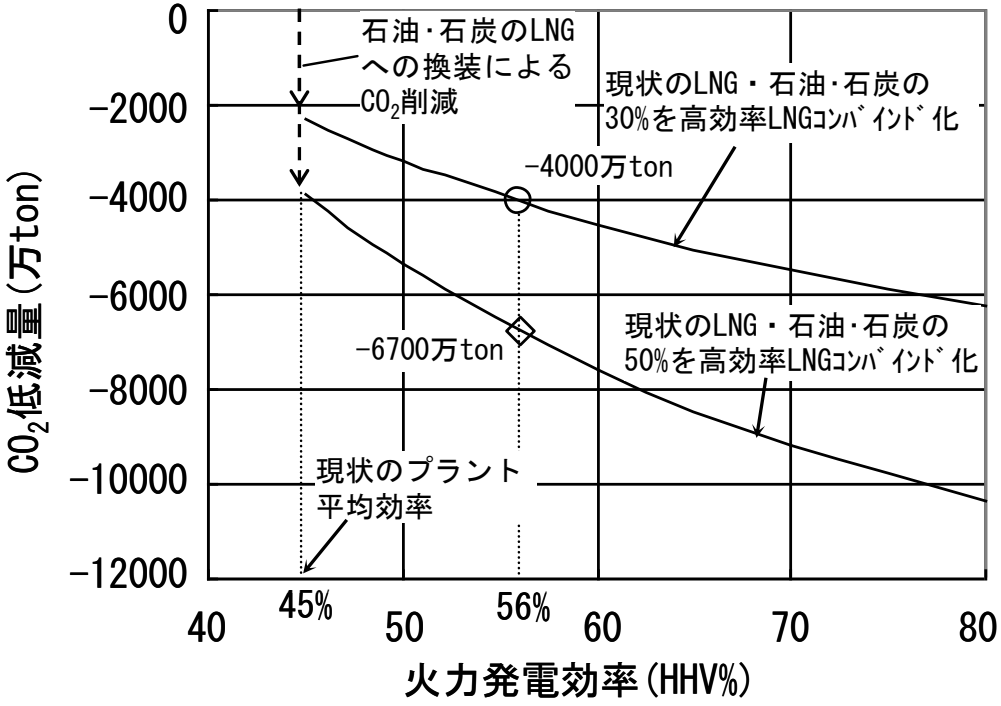
既存の火力発電所を1700℃級ガスタービンコンバインドサイクルに置き換えた場合のCO_2低減および省エネ効果

現状のLNG(平均発電効率45%)，石油および石炭火力を置き換えた場合の効果

置きかえる既存発電所の割合	CO_2削減量	全発電所からの排出量に占める割合	省エネルギー効果（原油換算）
30%	4000万ton/年	10%	1300万トン
50%	**6700万ton/年**	**17%**	**2200万トン**



わが国における電源構成の推移（プラント寿命40年）
出典：電力中央研究所



1700℃級ガスタービンCO_2低減効果

将来の展開

次世代発電技術の基盤を担う共通技術

1700℃級ガスタービンは、次世代発電の基盤を担う共通キー技術。

- **エネルギーの安定供給**
  - **燃料多様化---LNG、石炭IGCC、水素（原子力夜間電力で製造）のいずれにも適用可能**
- **環境にやさしい**
  - **火力発電システムの中で最も安価にCO2回収が可能**
- **卓越した経済性**
- **負荷調整能力**

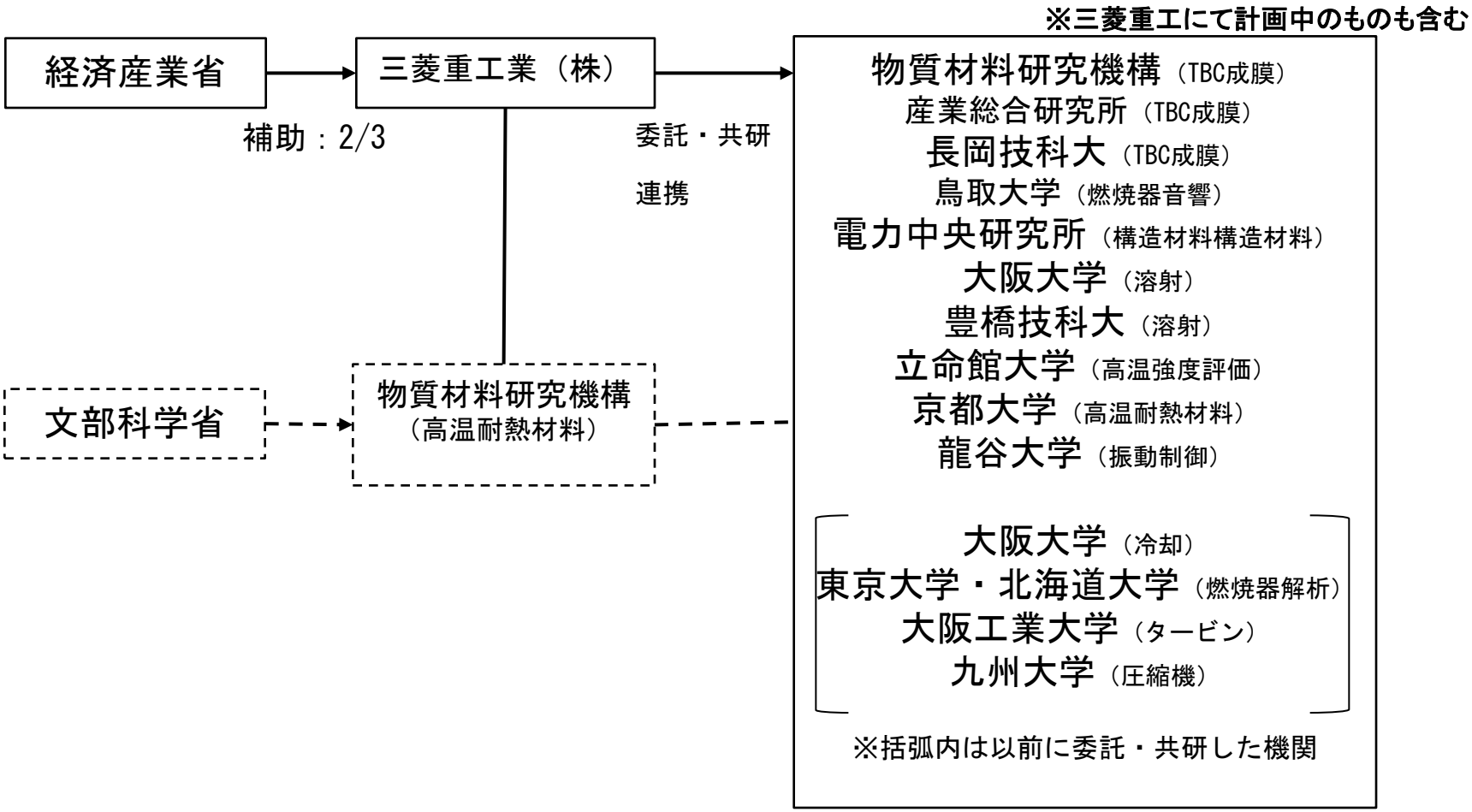
1700℃級ガスタービン

- **●LNG**
  - **超高効率57%複合発電**
  - **排ガス再循CO2回収システム**
- **●石炭**
  - **次世代高効率IGCC**
- **●水素ガスタービン**
  - **原子力夜間電力による水素製造**

6. 研究開発マネジメント体制

産官学連携・省庁間連携の体制を組んで推進中です。

○ プロジェクトリーダー：三菱重工業（株）　伊藤栄作



7．事前評価の結果（1/3）

《問題点・改善すべき点》

商用化には、目標の発電効率達成のための技術確立だけでなく、長期信頼性、経済性、メンテナンス性等も大きな要素となる。これらについても、数値目標を明確にして技術開発を進めることが望ましい。また、長期信頼性を検証するために、実証試験の運転時間は十分に取る計画にすることを提案する。

⇒　長期信頼性の確保については、1600℃級ガスタービンの運用実績を評価し、事業の研究内容に反映しています。具体的には、遮熱コーティングや冷却、燃焼安定性などです。

また、実証試験の運転時間を十分にとることについては、現状の予定では最終年度である平成32年の後半での試験となることから、事業期間や費用も含め、4年目終了時の計画見直し時に反映することと致します。

7．事前評価の結果（2/3）

《問題点・改善すべき点》

1700℃ガスタービン技術の目標とする送電端効率57%HHVは極めて高い目標であるが、排出NOx目標値（NOx<50ppm)は東京都、横浜市など地方自治体の独自規制値や協定に合致しない。東日本大震災の影響で東京都の規制は緩和されることになったが、長期的に見れば、本目標値では都市部での大容量機の設置には脱硝装置が必要あり、脱硝装置を含めた場合には、高い送電端効率と経済性を維持できるかどうかは疑問が残る。NOx<10ppmで運用する手法についても検討しておく必要がある。

⇒　通常、国内の複合発電設備では、脱硝装置が設置されています。従いまして、本事業の高い送電端効率は、脱硝装置の設置を前提とした目標となっています。NOx<10ppmのような厳しい排出規制が課せられる発電所では、脱硝装置の設置を前提とおります。

脱硝装置がつけられない場合は、若干燃焼温度を下げての運用となる可能性もありますが、各コンポーネント効率は世界最高レベルの目標を設定しており、その場合でも世界最高レベルの発電効率を確保できると考えています。

7．事前評価の結果（3/3）

《問題点・改善すべき点》

・特に大きな問題点が見受けられないが、送電端効率57%HHVという挑戦的な目標の達成には、各要素技術の改良・新規開発に加えて、製造、運転、検査、計測などあらゆる技術の包括的な改革が必要とされる。このため、長期にわたる開発・実証試験期間が不可欠であり、対象期間内での実現可能性を心配している。

⇒　ご指摘の通り、挑戦的な発電効率目標を達成するために、製造、安定運転のための燃焼・圧縮機技術、検査、計測など、あらゆる技術を包括した実施内容としています。

また、開発に遅れが出ないよう、1600℃級ガスタービンの運用実績データを活用しながら、研究を進めていきます。

開発・実証試験期間につきましては、現状対象期間内での技術開発に向けて順調に研究を進めております。

しかしながら、挑戦的な目標のために、今後未知の課題が発生する可能性も否定できませんので、4年目終了時の計画見直し時に、反映したいと考えます。

（参考）特許・論文等件数

	表彰	論文	投稿	発表	特許	電力会社ご視察
件数	１件	６件	７件	15件	22件	70回

非常に多くの電力会社様に
ご視察していただきました。

高効率ガスタービン技術実証事業（AHAT）の概要について

平成25年11月13日

日立製作所株式会社
住友精密工業株式会社
(財)電力中央研究所

目　次

１．プロジェクトの概要

２．目的・政策的位置付け

３．目標

４．成果、目標の達成度

５．事業化、波及効果

６．研究開発マネジメント・体制等

７．事前評価結果

1．プロジェクトの概要

概　　要	電力産業の短中期的ニーズに対応する中小容量機（10万kW程度）の高効率化のために、高湿分空気利用ガスタービン（AHAT）の実用化に必要な多段軸流圧縮機、多缶燃焼器等の開発を行うとともにシステムの長期信頼性等の実証等を行う。
実施期間	平成24年度～平成32年度（9年間）
予算総額	383億円（ 補助（補助率：2/3））

年度	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32
億円	7.2	10.7	8.9	5.5	36.4	82.1	28.5	101.7	101.7

実 施 者	（株）日立製作所、（一財）電力中央研究所、住友精密工業（株）
プロジェクトリーダー	㈱日立製作所　日立研究所　ターボ機械研究部　部長　圓島信也

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け

目的

平成20年3月に閣議決定された「Cool Earth ―エネルギー革新技術計画」において、天然ガスタービンの高効率化が環境負荷低減の実現のための重要な技術開発であると位置づけられている。

また、平成23年8月に制定された「第4期科学技術基本計画」においては、安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現のため火力発電の高効率化に資する技術開発は重点的な取組として位置づけられている。

これらの政策を実現するために、発電規模に応じた発電熱効率の一層の向上が必要であり、ガスタービン高温部品の技術向上と発電サイクルの工夫が必要不可欠である。また、環境負荷の少ない発電システムを開発することは、電力の安定的かつ低廉な供給を確保する上で極めて重要な対策である。

電力産業の短中期的ニーズに対応する中小容量機（10万kW程度）の高効率化のために、高湿分空気利用ガスタービン（AHAT*1）の実用化に必要な多段軸流圧縮機、多缶燃焼器等の開発を行うとともにシステムの長期信頼性等の実証等を行う。

＊1：AHAT：Advanced Humid Air Turbine

国のエネルギー技術開発戦略における高効率ガスタービンの位置づけ

高効率ガスタービンは、二酸化炭素排出量を抑制できる高効率天然ガス発電であり、「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」において、「重点的に取り組むべきエネルギー革新技術」の一つとして位置付けられている。

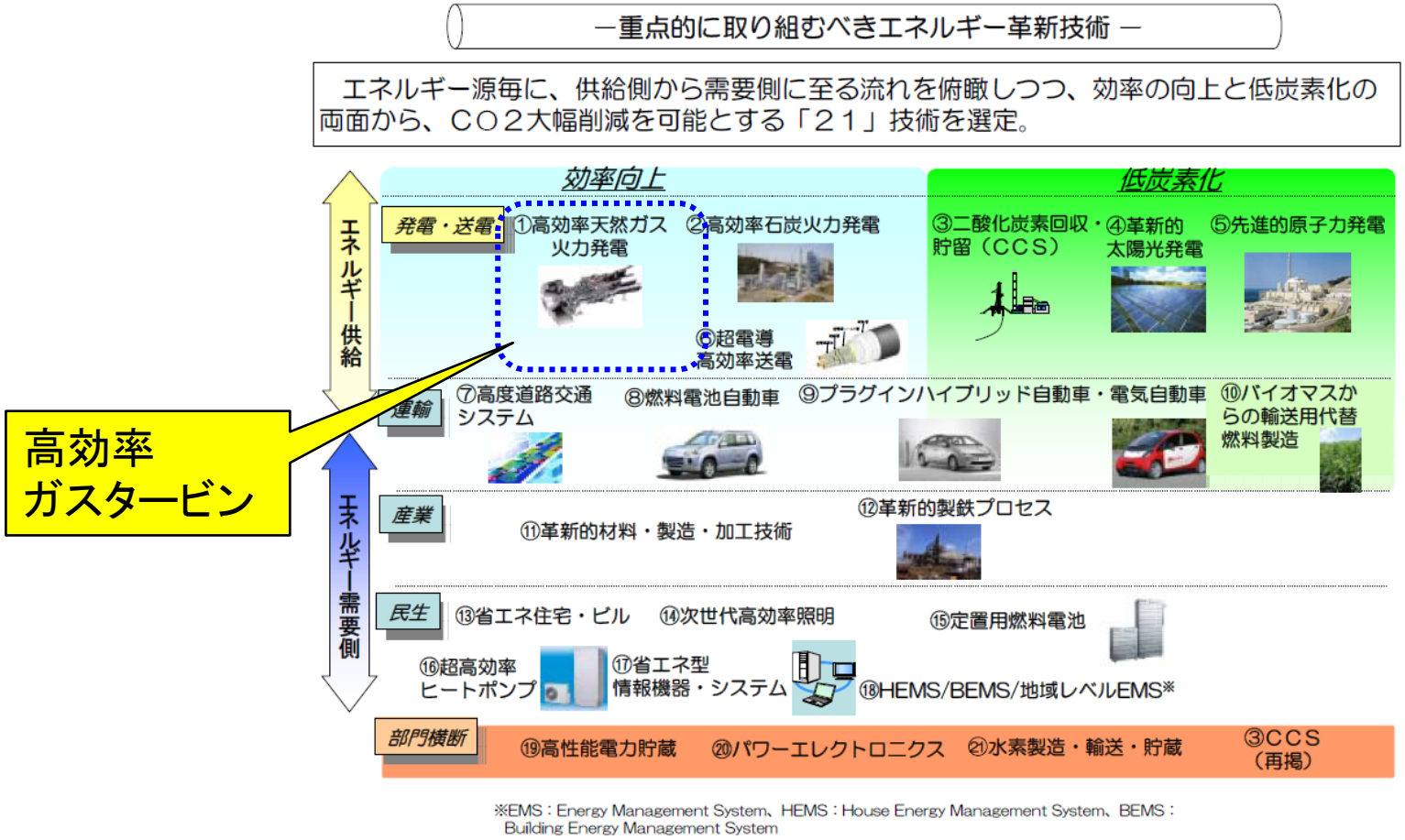


図　「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」(平成20年3月、経産省)における高効率天然ガス火力発電の位置づけ

国のエネルギー技術開発戦略におけるAHATの位置づけ

AHAT(高湿分空気利用ガスタービン)は、「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」の高効率天然ガス火力発電のロードマップにおいて、2020年代に実用化を目指す技術として位置付けられている。

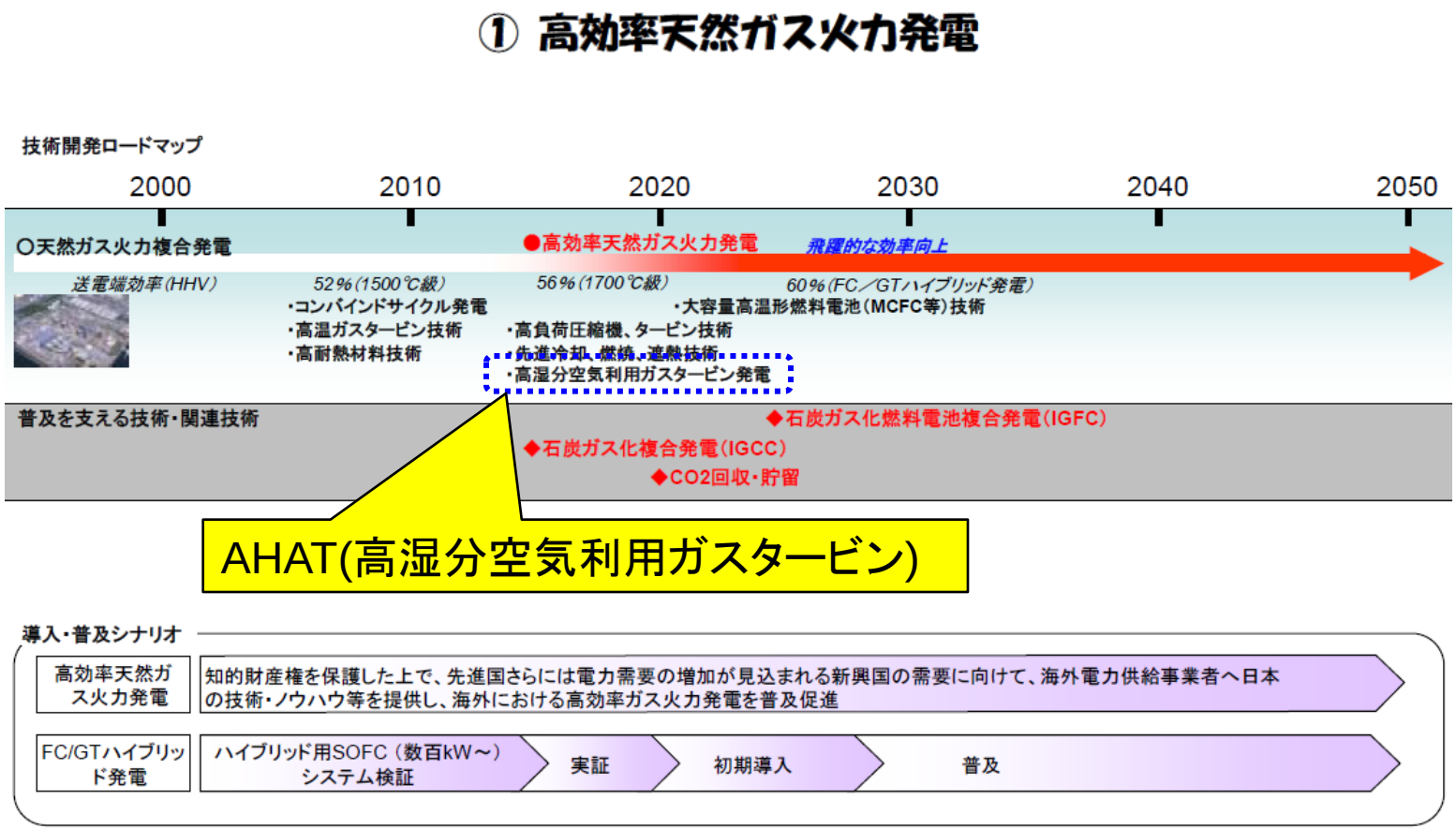


図　「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」(平成20年3月、経産省)におけるロードマップ

国の科学技術戦略における高効率火力発電の位置づけ

平成23年8月に制定された「第4期科学技術基本計画」においては、安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現のため、火力発電の高効率化に資する技術開発は重点的な取組として位置づけられている。

Ⅱ. 将来にわたる持続的な成長と社会の発展の実現

1. 基本方針

震災からの復興、再生を遂げ、将来にわたる持続的な成長と社会の発展に向けた科学技術イノベーションを戦略的に推進

2. 震災からの復興、再生の実現

ⅰ）被災地の産業の復興、再生、ⅱ）社会インフラの復旧、再生、ⅲ）被災地における安全な生活の実現

3. グリーンイノベーションの推進

ⅰ）安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現　ⅱ）エネルギー利用の高効率化・スマート化
ⅲ）社会インフラのグリーン化

火力発電の高効率化を推進と記載

4. ライフイノベーションの推進

ⅰ）革新的な予防法の開発　ⅱ）新しい早期診断法の開発
ⅲ）安全で有効性の高い治療の実現、　ⅳ）高齢者、障害者、患者の生活の質（QOL）の向上

5. 科学技術イノベーションの推進に向けたシステム改革

（1）科学技術イノベーションの戦略的な推進体制の強化
①「科学技術イノベーション戦略協議会（仮称）」の創設　②産学官の「知」のネットワーク強化
③産学官協働のための「場」の構築　（オープンイノベーション拠点の形成等）
（2）科学技術イノベーションに関する新たなシステムの構築
①事業化支援の強化に向けた環境整備　②イノベーションの促進に向けた規制・制度の活用
③地域イノベーションシステムの構築　④知的財産戦略及び国際標準化戦略の推進

図　「第4期科学技術基本計画」(平成23年8月、文部科学省)における
火力発電の高効率化の位置づけ

日本再興戦略における高効率火力発電の位置づけ

「日本産業再興プラン」、「戦略市場創造プラン」のなかで、高効率火力発電の先進技術開発の加速が宣言されている。

一．日本産業再興プラン
　5．立地競争力の更なる強化（世界で一番企業が活動しやすい国を目指す）
　　⑦環境・エネルギー制約の克服
　　〇高効率火力発電（石炭・LNG）の導入
　　・環境省と経済産業省が合意した環境アセスメントの明確化・迅速化を踏まえ、今後、**高効率火力発電（石炭・LNG）について、環境に配慮しつつ導入を進めるとともに、技術開発を進めて発電効率の更なる向上を目指す。**

二．戦略市場創造プラン
　テーマ2：クリーン・経済的なエネルギー需給の実現
　　①クリーンで経済的なエネルギーが供給される社会
　　Ⅱ）解決の方向性と戦略分野（市場・産業）及び当面の主要施策
　　先進技術開発を加速し、世界最高水準の効率を有する火力発電を我が国で率先して導入するとともに、世界へ積極的に展開する。

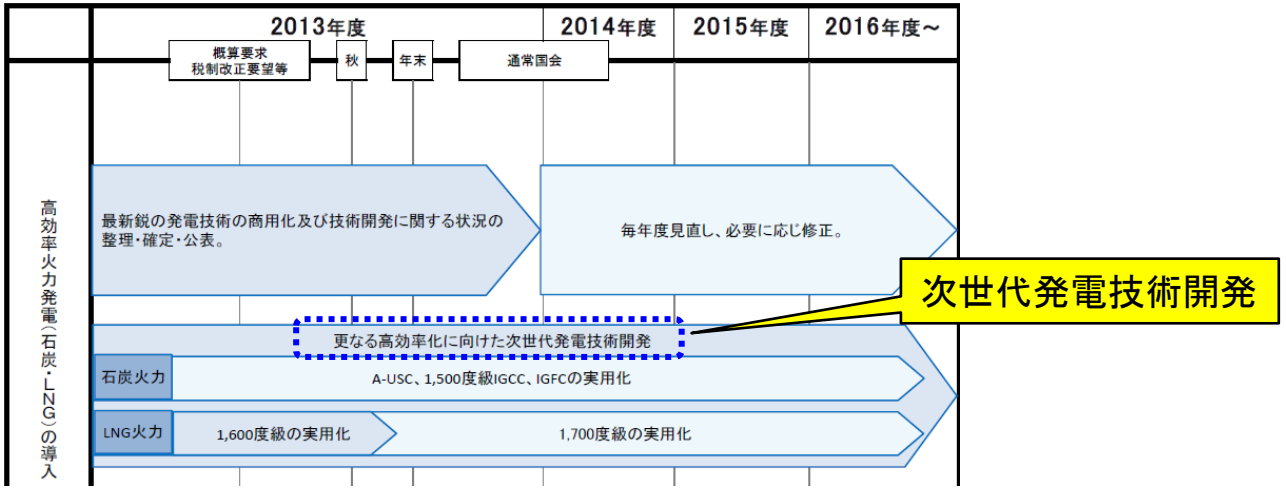


図　「日本再興戦略」(平成25年6月、内閣府)における高効率火力発電の位置づけ

「環境エネルギー技術革新計画」におけるAHATの位置づけ

●2020年頃までに10万kW級で51%（送電端・HHV）の発電効率を実現することを目標としている※。
●高効率圧縮機設計技術やタービン翼冷却技術の開発が必要である※。

※出典：総合技術会議 「環境エネルギー技術革新計画」(平成25年7月、内閣府)

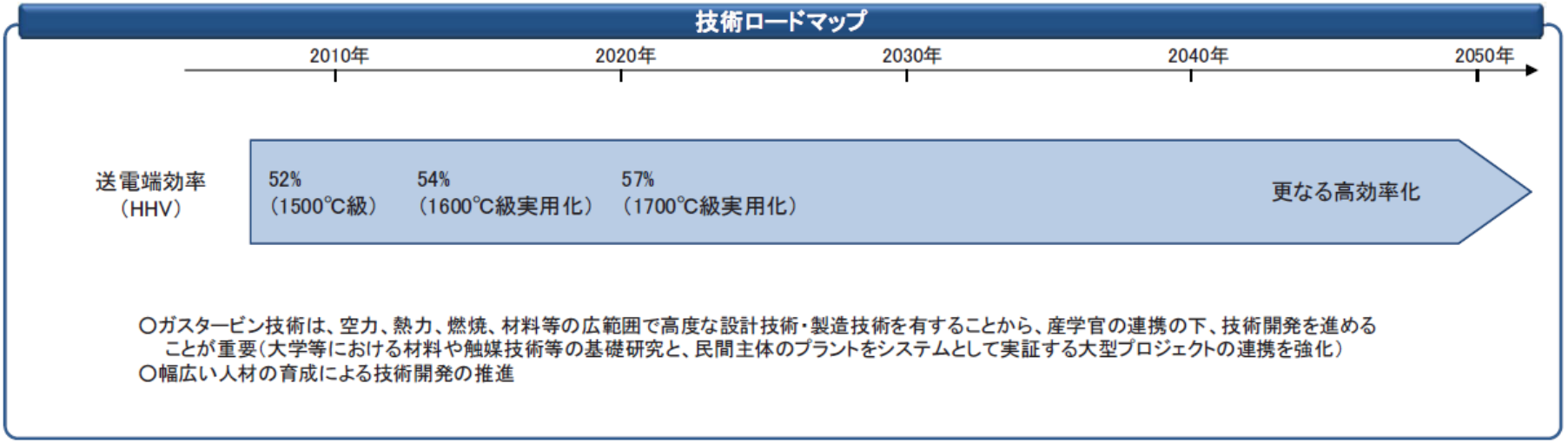
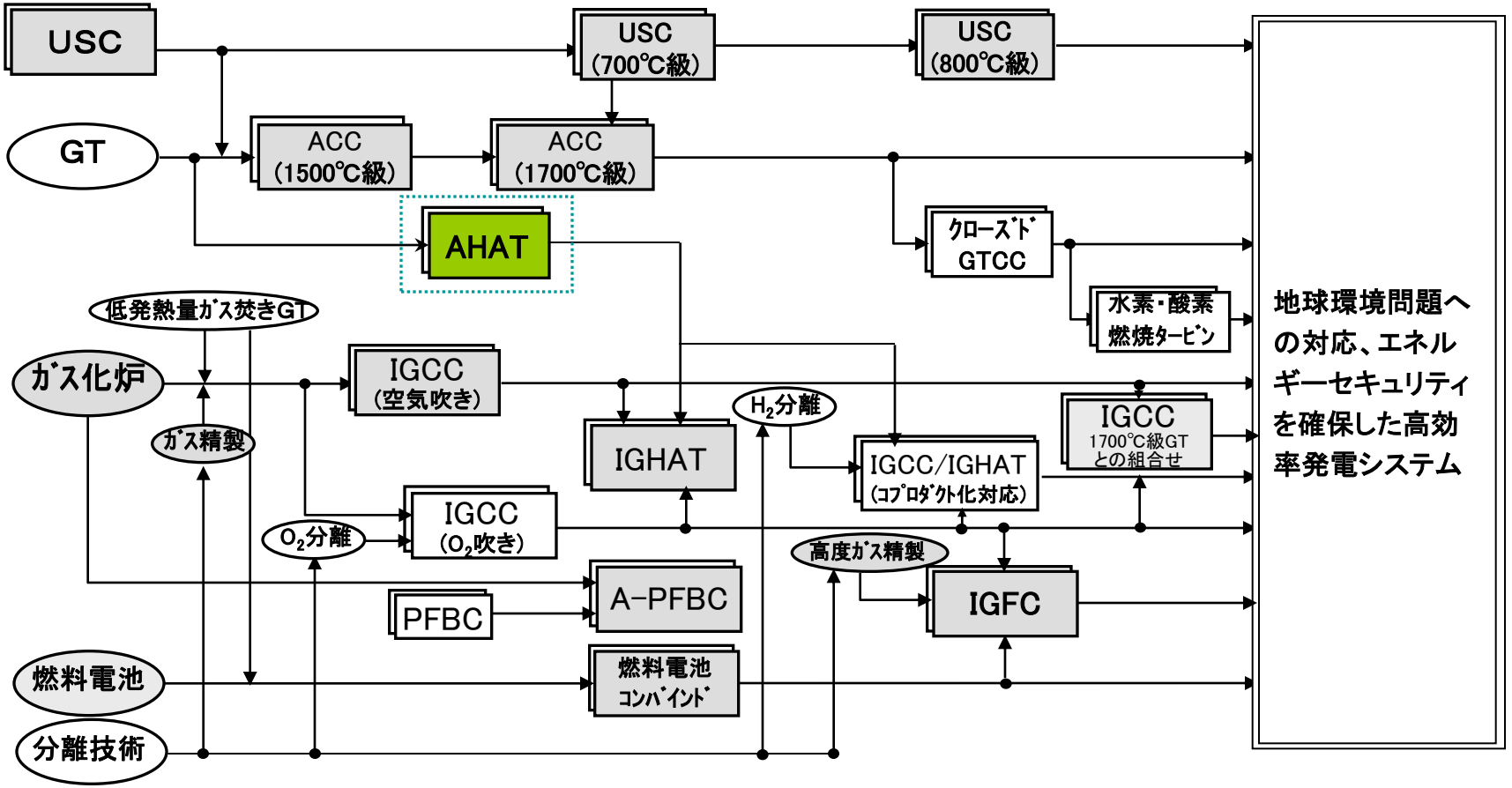


図　総合技術会議 「環境エネルギー技術革新計画」(平成25年7月、内閣府)
における高効率天然ガス発電のロードマップ

他の発電システムとAHATの位置づけ

AHATはガスタービンサイクルを改良したシステムであり、比較的早期に実用化が期待できる高効率発電システムである。また、次世代高効率発電システムである石炭ガス化と組み合わせたIGHATへ展開できる技術である。



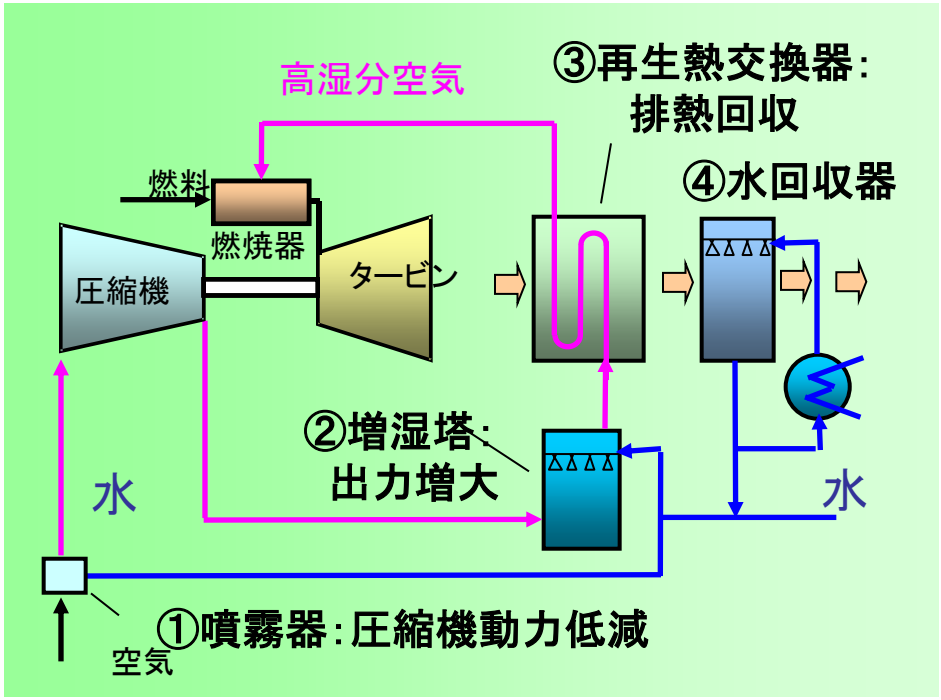
：発電システム　：要素技術　網掛：調査対象技術　：目的

出典：「電力分野産業技術戦略」に関わる動向調査報告書　平成16年6月　（財）エネ総工研

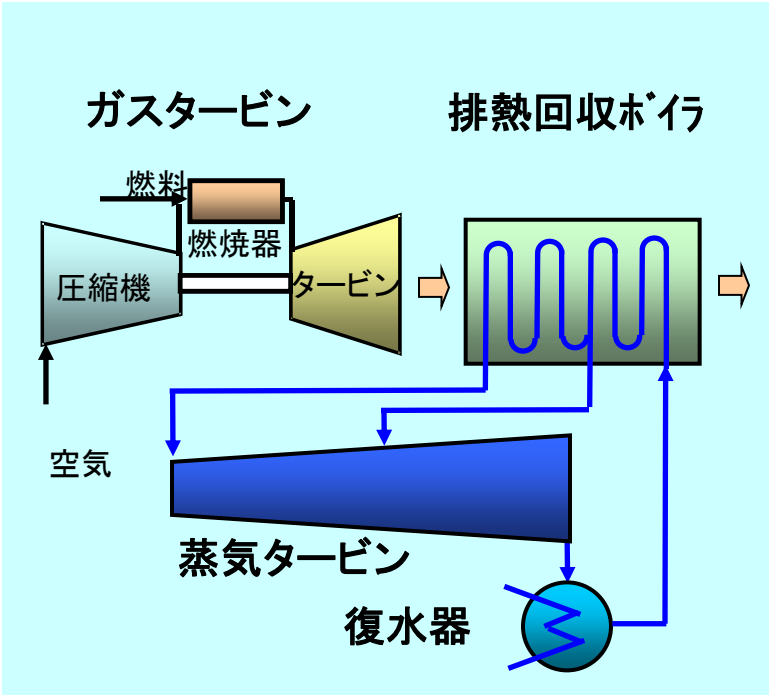
3. 目標

AHATとは（1）

日本オリジナルの技術であり、高湿分空気を利用したガスタービン単独の発電システムである。コンバインドサイクルの蒸気タービン蒸気量に匹敵する湿分を増湿塔で加え、ガスタービン排熱を高湿分再生熱交換器で回収し、ガスタービンで利用する。



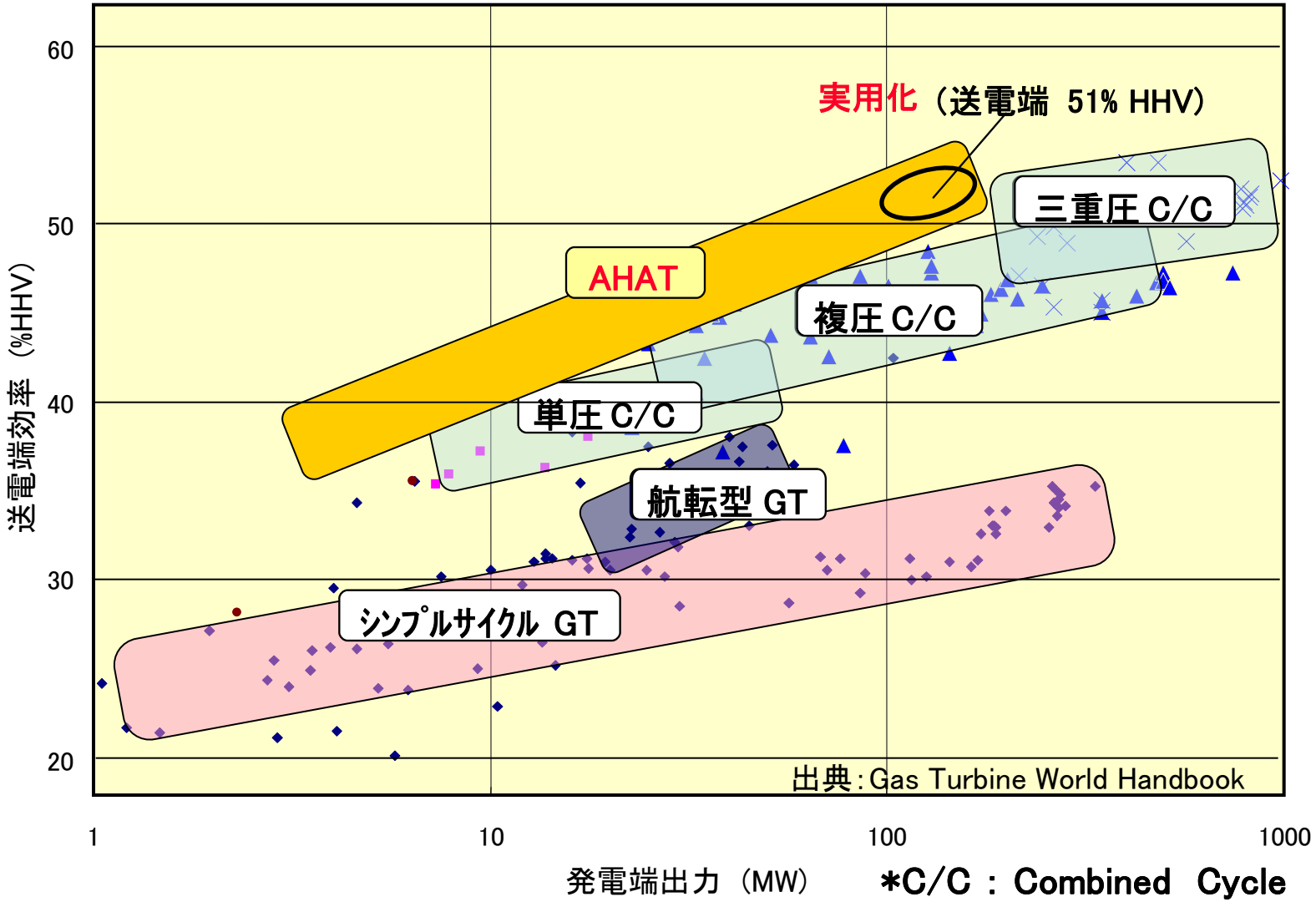
AHAT



コンバインドサイクル

AHATとは(2)

中小容量機(10万kW程度)で、コンバインドサイクルの効率を凌ぐ新型ガスタービン発電システムである。



3．目標

AHATとは（3）

AHATは、運用性、環境性、経済性に優れた発電システムである。

◎：特に優位　○：優位　－：同等

項目		AHAT		コンバインドサイクル
運用性	起動時間	◎	ST系なく、起動時間短い	ST　HRSG暖機要
	負荷即応性	◎	GT単独運転並み	ベース
	最低負荷	◎	高湿分燃焼により低負荷で運転可能	低 NO x安定燃焼の制限
	大気温度特性	○	吸気噴霧冷却：高気温時の出力低下小	GTおよびST出力低下
	制御	○	GT 制御が主でシンプル	GT 、ST 制御あり
環境性	NO x対策	○	GT：高湿分空気燃焼、GT排気：必要に応じ脱硝装置	GT：低NOx燃焼器、又は、水噴射、又は蒸気噴射、GT排気：脱硝装置
	立地制約	◎	水回収水温60℃程度：冷却塔冷却 内陸部にも設置可能	ST出口温30℃程度：復水器冷却 沿岸（海水への温排水）
経済性	機器構成、工期	◎	ST系なく、構成シンプルで工期も短い	ベース
	配管	－	GT 圧縮機吐出圧力低く、薄肉 ただし、再生サイクル配管径大	HRSG 高圧系圧力高く、肉厚 ただし、主蒸気配管径小
	水質管理	－	水処理装置（イオン交換樹脂等）設置	薬注による　pH 調整
	ユーティリティ消費	－	純水(圧縮機吸気噴霧冷却用),ｱﾝﾓﾆｱ(脱消用)、冷却水(冷却塔補給用)	純水(HRSGﾌﾞﾛｰ補給用)、ｱﾝﾓﾆｱ(脱消用)、冷却水(補給用)
	メンテナンス費用	○	構成機器少ない（排熱回収系、水回収系）	排熱回収系、ST系、復水器系

GT：ガスタービン、ST：蒸気タービン、HRSG：排熱回収ボイラ

3. 目標

目的1：AHATの信頼性を確保するガスタービン技術の開発（テーマ(1)～(4)）
目的2：AHATシステムの長期信頼性等の実証（テーマ(5)～(7)）

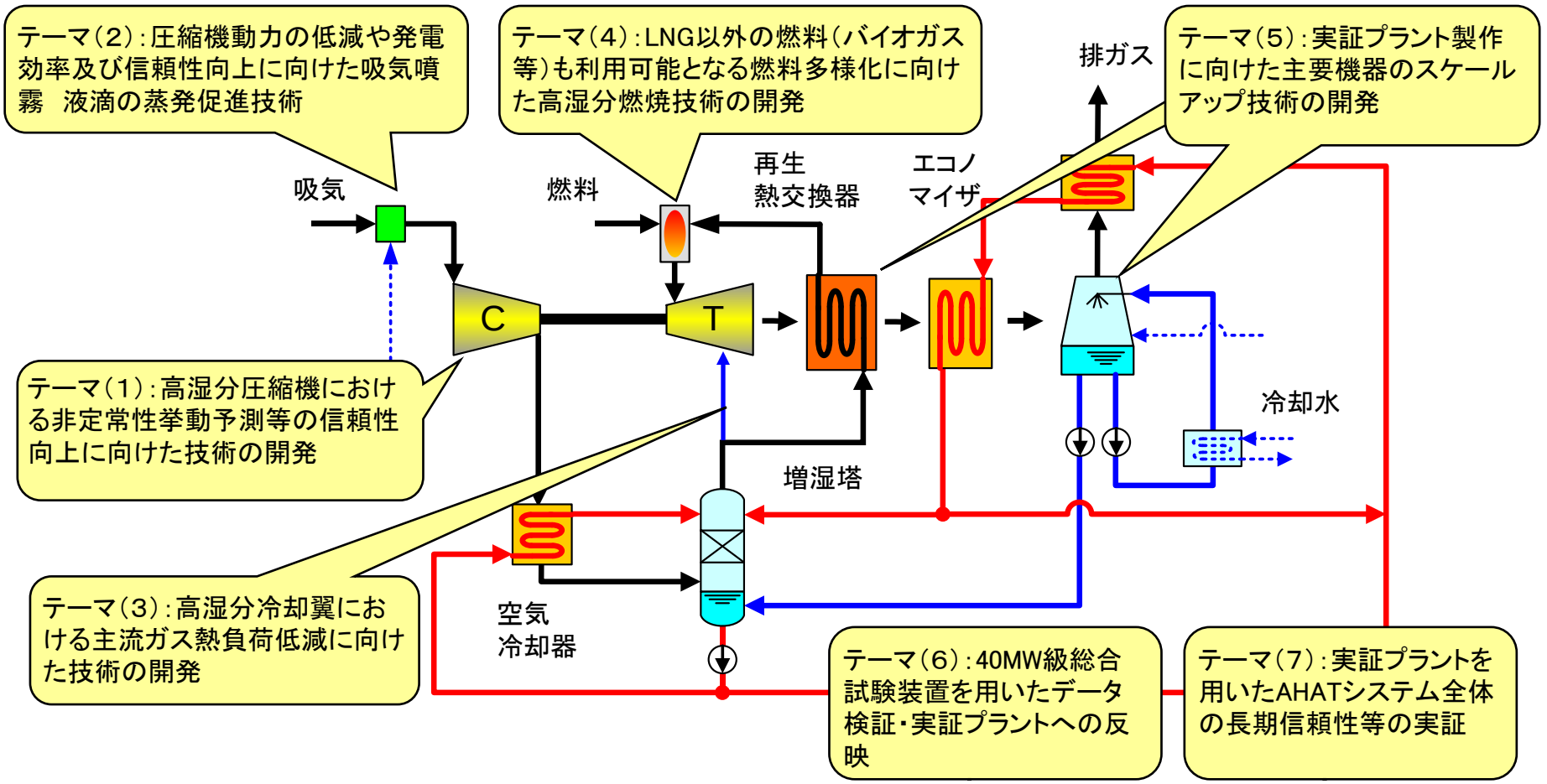


図 AHATの開発課題と本事業の目的

AHATの開発課題と本事業の目的

目的1．電力産業の短中期的ニーズに対応する中小容量機（10万kW程度）の高効率化のため、AHATガスタービンの実用化に必要な多段軸流圧縮機、多缶燃焼器等の開発を行う。
（高信頼性化技術：AHATの信頼性を確保するガスタービン技術）

テーマ（1）：高湿分圧縮機における非定常性挙動予測等の信頼性向上に向けた技術の開発

テーマ（2）：圧縮機動力の低減や発電効率及び信頼性向上に向けた吸気噴霧液滴の蒸発促進技術

テーマ（3）：高湿分冷却翼における主流ガス熱負荷低減に向けた技術の開発

テーマ（4）：LNG以外の燃料（バイオガス等）も利用可能となる燃料多様化に向けた高湿分燃焼技術の開発

目的2．AHATシステムの長期信頼性等の実証を行う。

テーマ（5）：実証プラント製作に向けた主要機器のスケールアップ技術の開発

テーマ（6）：40MW級総合試験装置を用いたデータ検証・実証プラントへの反映

テーマ（7）：実証プラントを用いたAHATシステム全体の長期信頼性等の実証

3．目標

AHATの開発目標

下表の要素技術項目は、天然ガスを燃料とした10万kW級中容量高湿分空気利用ガスタービンシステムにおいて、送電端効率51%、NOx排出濃度10ppm以下（16%O2）を達成可能にする。

要素技術	目標・指標（事後評価）	目標・指標（中間評価）	妥当性・設定理由・根拠等
(1)高湿分圧縮機	圧縮機の吸込流量20%削減と信頼性確保の両立	チップカット技術※の確立 (※翼先端部をカットして吸込み流量を削減する技術)	フルAHATシステムの流量バランスを成立させるのに必要な削減量として20%を選定した。
(2)蒸発促進技術	吸気噴霧量3.5%以上と信頼性確保の両立	3次元数値解析と蒸発予測アルゴリズムの併用による予測手法の構築	既存の圧縮機に対して大幅な改造を伴わない限界噴霧量として3.5%を選定した。
(3)高湿分冷却翼	静翼冷却効率70%以上、空力損失10%削減を両立する冷却技術の開発	・熱負荷低減構造の有効性確認 ・タービン内部流れの詳細計測技術の開発	AHATの優位性を損なわないため、高熱負荷条件でも冷却空気量と空力損失を低減できる技術開発が必要。
(4)高湿分燃焼器	LNG以外の多様な燃料に対してNOx：10ppm以下となる高湿分燃焼器の設計技術開発	・多様化燃料の燃焼特性評価技術 ・燃焼器冷却技術	高湿分空気による燃焼では燃焼の不安定化が懸念される、低NOxと燃焼安定性の両立を勘案し設定した。
(5)スケールアップ技術	・再生熱交換器の大容量化、長期信頼性の確保 ・大容量化に適した水回収装置の検討	・材料面、構造面での信頼性確保技術の開発 ・充填物式水回収装置の性能検証、予測手法確立	・大型化により熱応力等が増大し、従来以上に材料、構造の検討が必要。 ・大容量化向きの充填物式の性能検証により、実証機仕様を策定する。
(6)40MW級総合試験	・高湿分ガスタービンの構成機器の健全性確認 ・実証機の性能予測	・開放点検による機器健全性確認 ・定格出力による運転 ・部分負荷、起動特性の評価	・実証機設計の前に、定格出力による運転と機器健全性確認、不具合摘出が必要。 ・ユーザーとしては定格性能以外の部分負荷等の特性も重要視している。
(7)実証機試験	実証機による、システム全体の長期信頼性の実証	実証機の体制、方法の検討	実用化に先立ち、商用機に準じた規模での長期信頼性検証が必要。

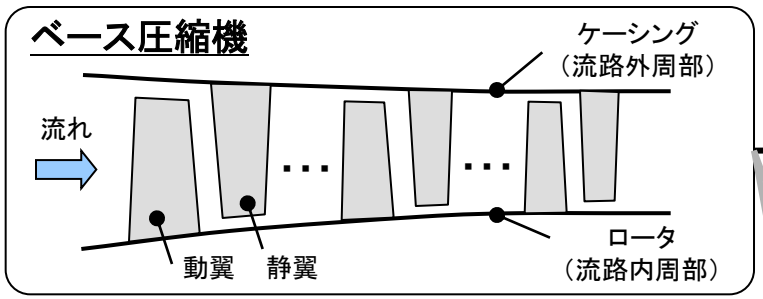
4. 成果、目標の達成度

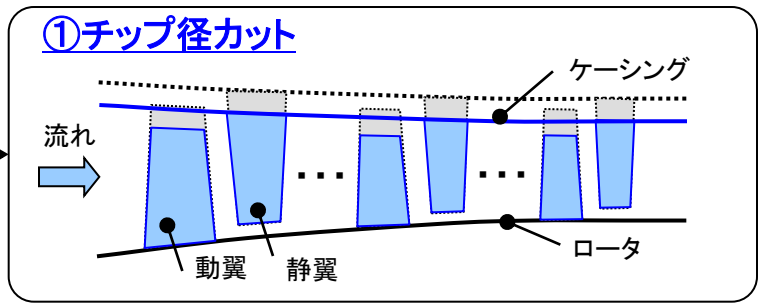
本事業での実施項目は達成しており（中間評価）予定どおり順調に進捗している。

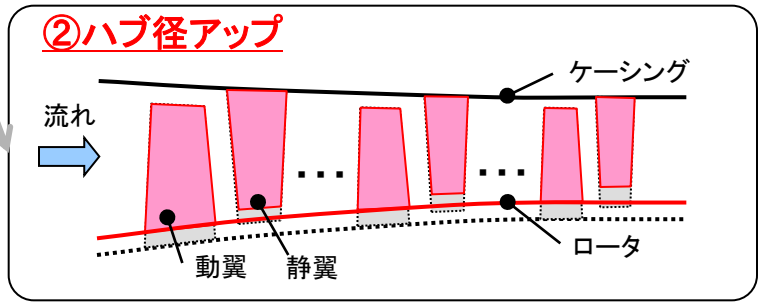
要素技術	目標・指標（中間評価）	成果	達成度
(1)高湿分 圧縮機	チップカット技術※の確立 (※翼先端部をカットして吸込み流量を削減する技術)	既存の圧縮機に対する流量削減方法を検討し、チップ径カットによって効率達成と信頼性確保を両立する見通しを得た。	達成
(2)蒸発 促進技術	3次元数値解析と蒸発予測アルゴリズムの併用による予測手法の構築	液滴挙動の影響を組み込んだ3次元数値解析手法の妥当性を確認し、吸気部の解析に適用した。	達成
(3)高湿分 冷却翼	・熱負荷低減構造の有効性確認 ・タービン内部流れの詳細計測技術の開発	・熱負荷低減のための基本構造を考案し、解析により有効性を確認した。 ・タービン内部流れを模擬する環状セクター試験装置と計測装置を製作した。	達成
(4)高湿分 燃焼器	・多様化燃料の燃焼特性評価技術 ・燃焼器冷却技術	・要素燃焼試験装置を開発した。 ・燃焼解析，冷却促進技術を開発した。	達成
(5)スケール アップ技術	・材料面、構造面での信頼性確保技術の開発 ・充填物式水回収装置の性能検証、予測手法確立	・コア接合溶接の最適条件を検討、確認した。耐食処理条件を検討し、成膜品質の改良を確認した。 ・1/60規模の水回収試験装置を設計製作しデータ取得、性能予測手法を確立した。	達成
(6)40MW級 総合試験	・開放点検による機器健全性確認 ・定格出力による運転 ・部分負荷、起動特性の評価	・ガスタービンの内部開放点検により、加湿運転後の健全性を確認した。 ・定格出力により一定時間(ヒートラン)運転した。 ・加湿による効率向上、3MWより高い部分負荷特性が得られた。	達成
(7)実証機試験	実証機の体制、方法の検討	実証機の実施形態を検討した。	達成

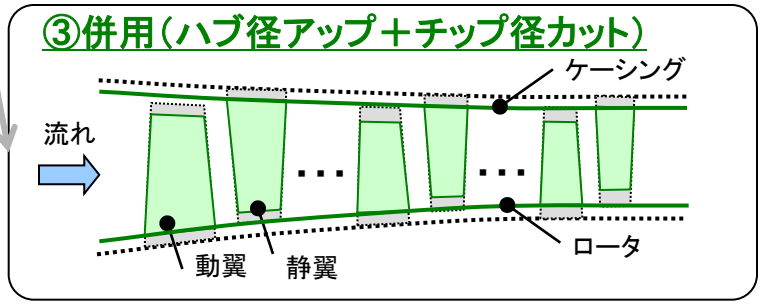
(1) 高湿分圧縮機：流量削減方法検討

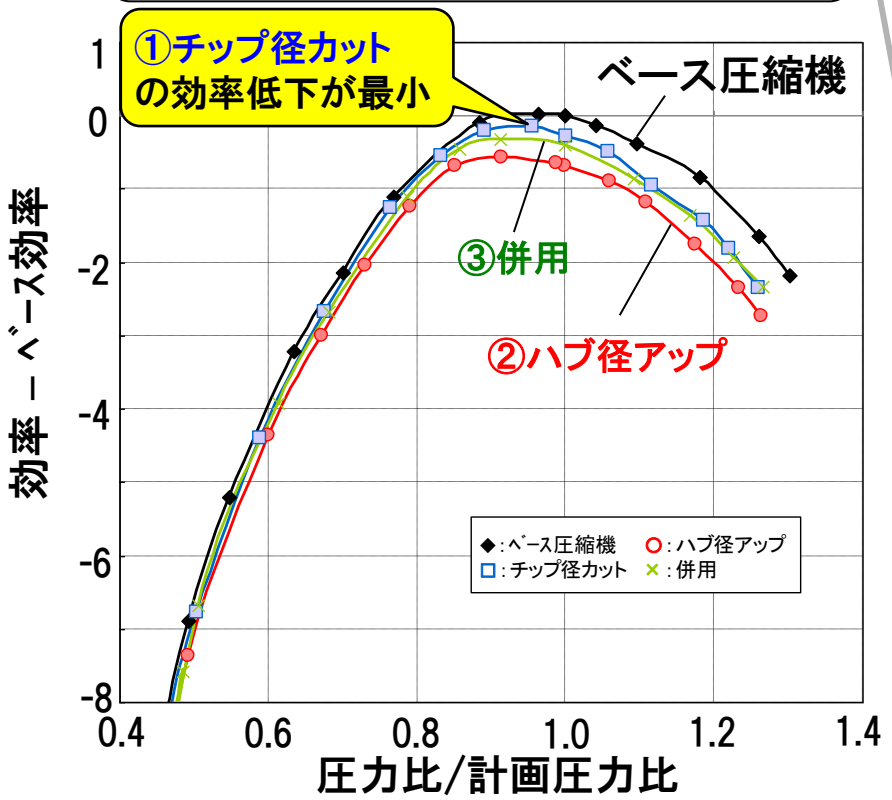
チップ径カットを含む3種類の流量削減方法について既存の圧縮機を対象に検討し、外周側の翼をカットするチップ径カットの有用性を確認した。





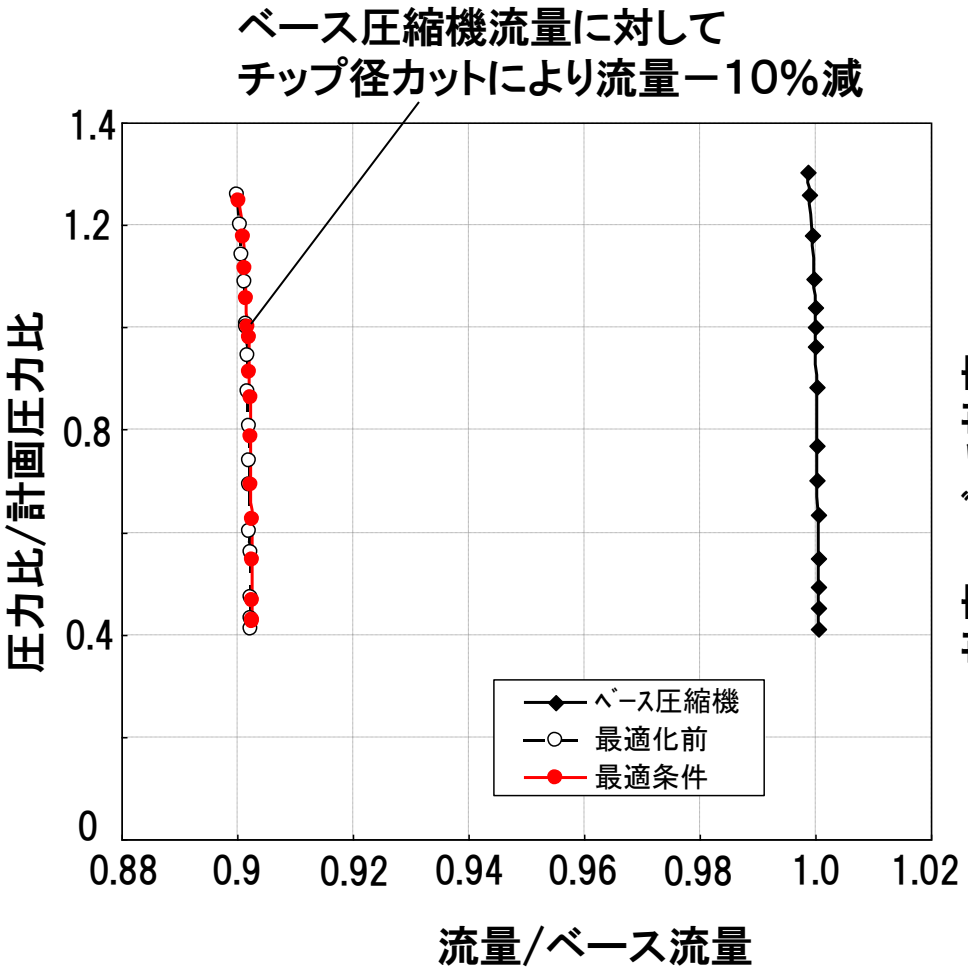


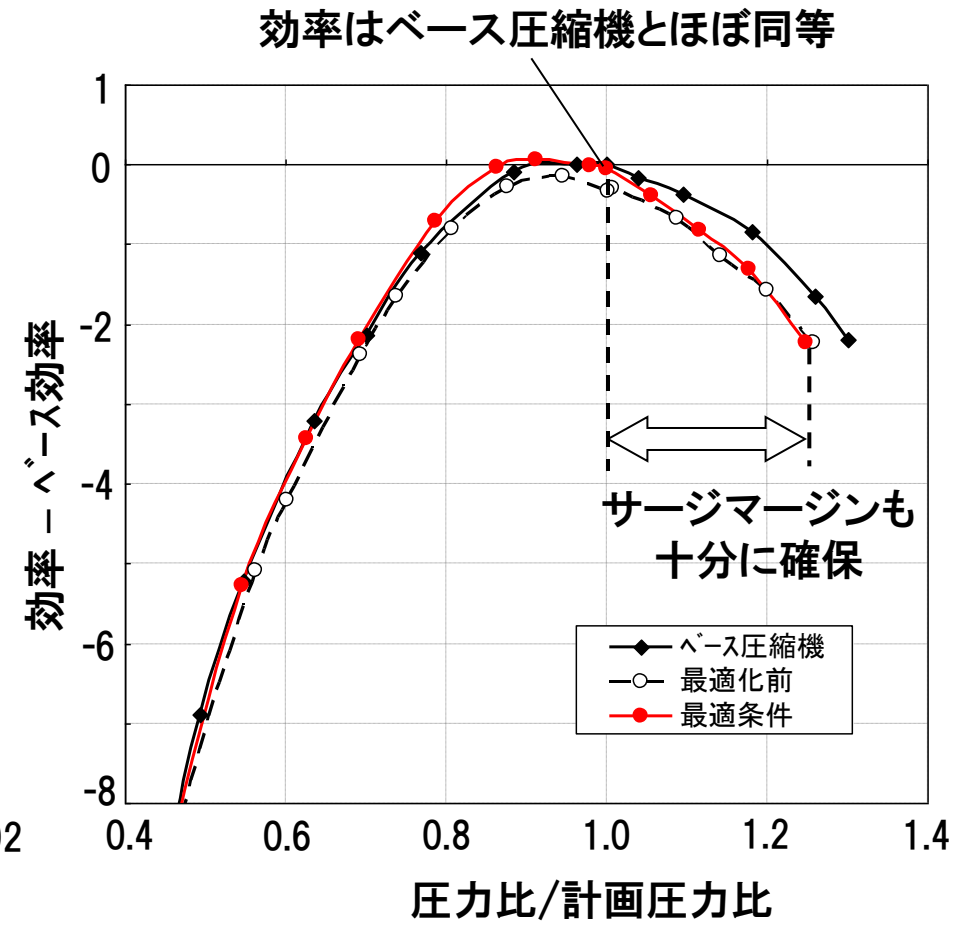




(1) 高湿分圧縮機：大気温度特性を考慮したチップカット圧縮機設計

大気温度特性を考慮してチップカット圧縮機の最適設計を実施し、目標効率を達成しつつサージマージン（信頼性の指標）を確保できる見通しを得た。





(2) 蒸発促進技術：3次元数値解析の適用性検討

主流と液滴の相互作用をモデル化した3次元数値解析手法の適用性を検討した。液滴蒸発実験や性能予測アルゴリズムと比較し、妥当性を確認した。

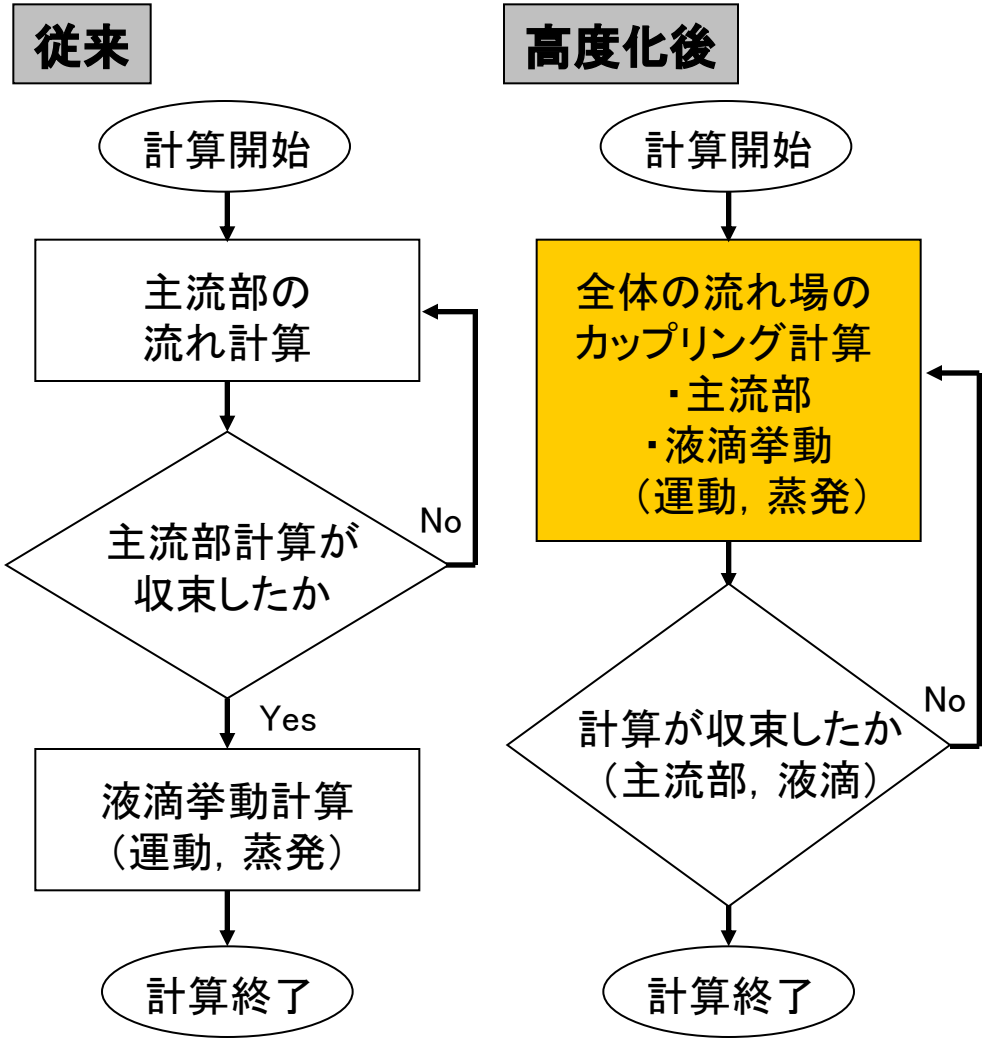


図　解析フローチャート比較

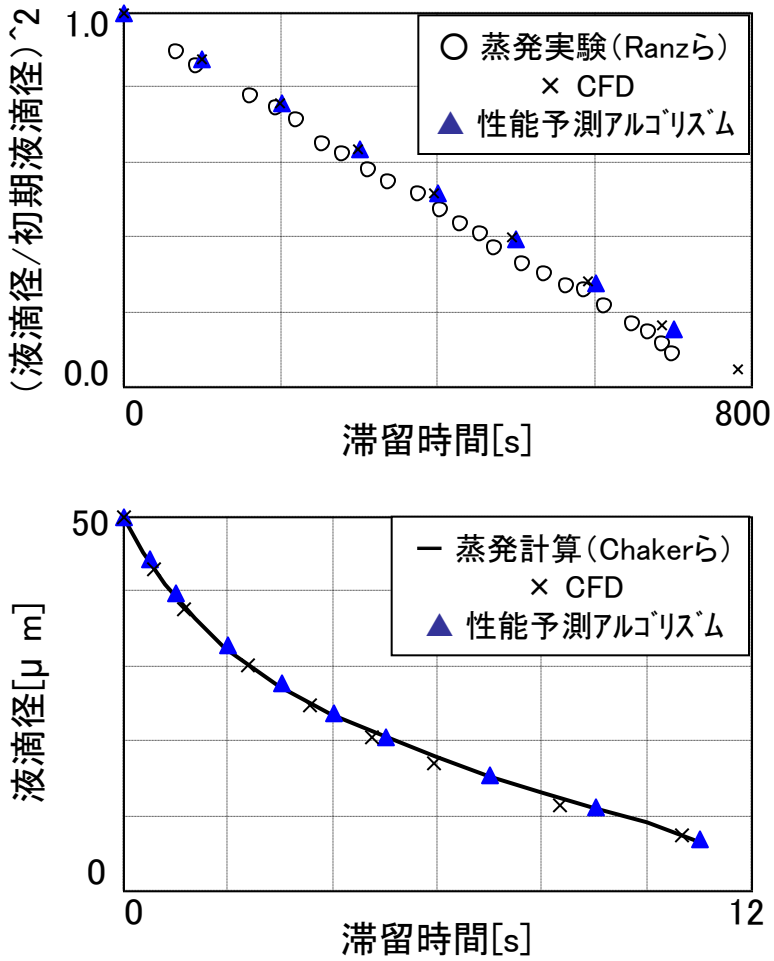
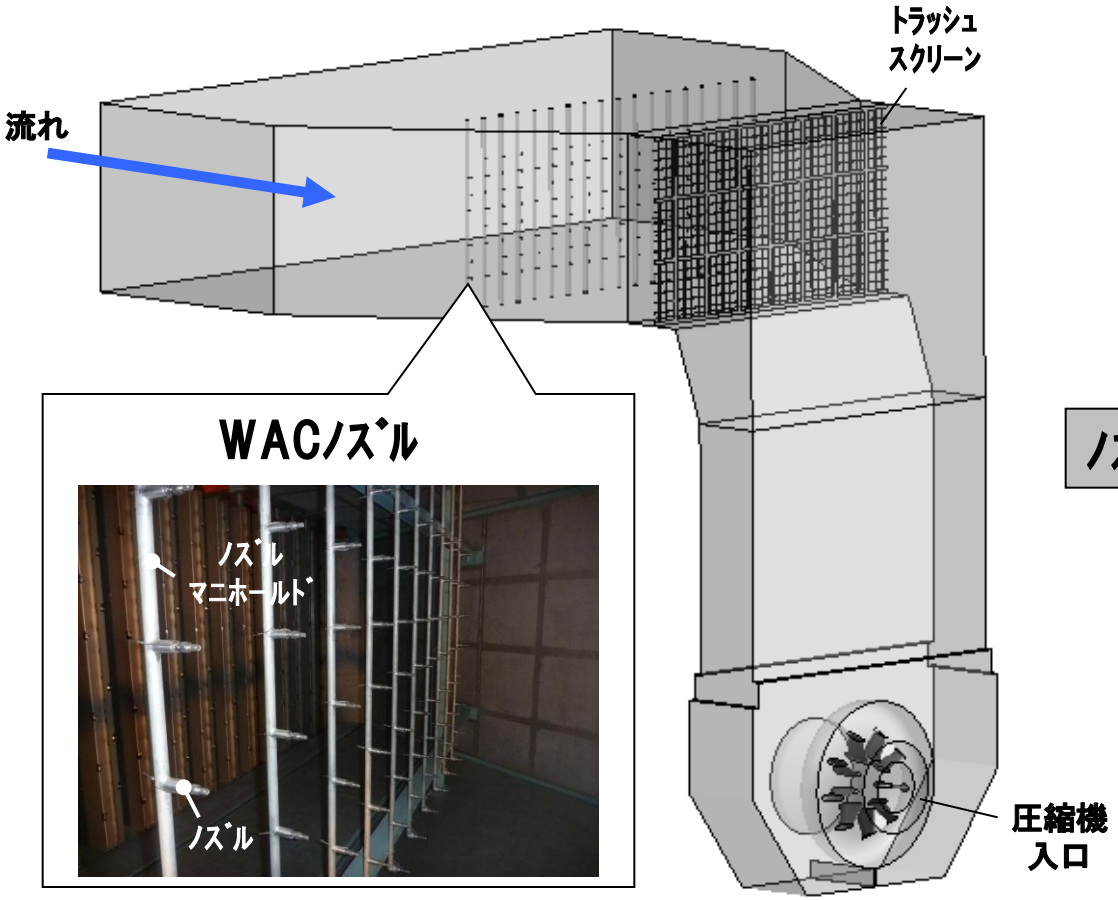


図　液滴径分布比較

(2) 蒸発促進技術：3次元数値解析を用いた吸気部解析

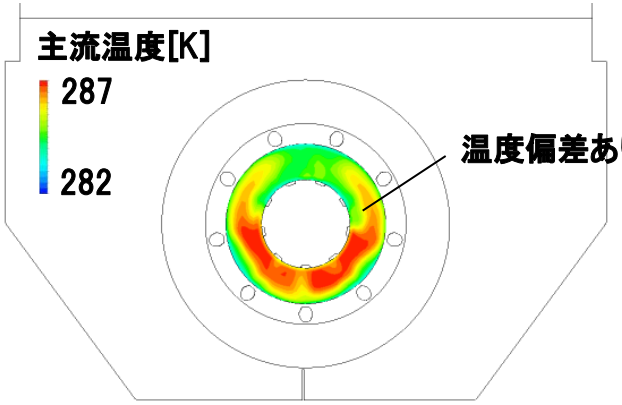
3次元数値解析により40MW級総合試験装置の吸気部の流れ場を解析し、噴霧ノズル数が圧縮機入口（温度分布等）に及ぼす影響を検討した。

解析領域



WACﾉｽﾞﾙ

ﾉｽﾞﾙマニホールﾄﾞ4セット噴霧



ﾉｽﾞﾙマニホールﾄﾞ9セット（全数）噴霧

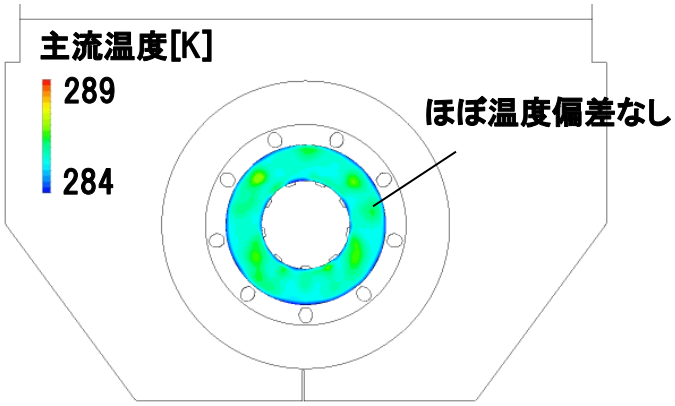


図　圧縮機入口温度分布

(3) 高湿分冷却翼：熱負荷低減構造の有効性確認

●流れ制御構造とフィルム冷却孔を組合せた高性能冷却構造を考案した。
●従来円孔の約4倍の平均フィルム冷却効率達成の見通しを得た。

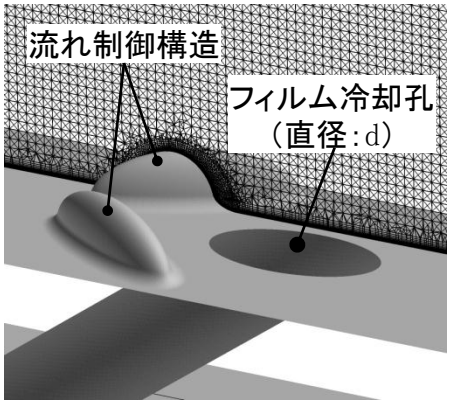


図1　高性能フィルム冷却構造と計算格子

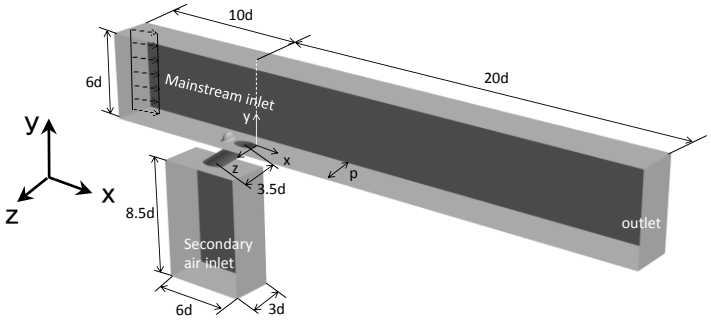


図2　数値解析領域

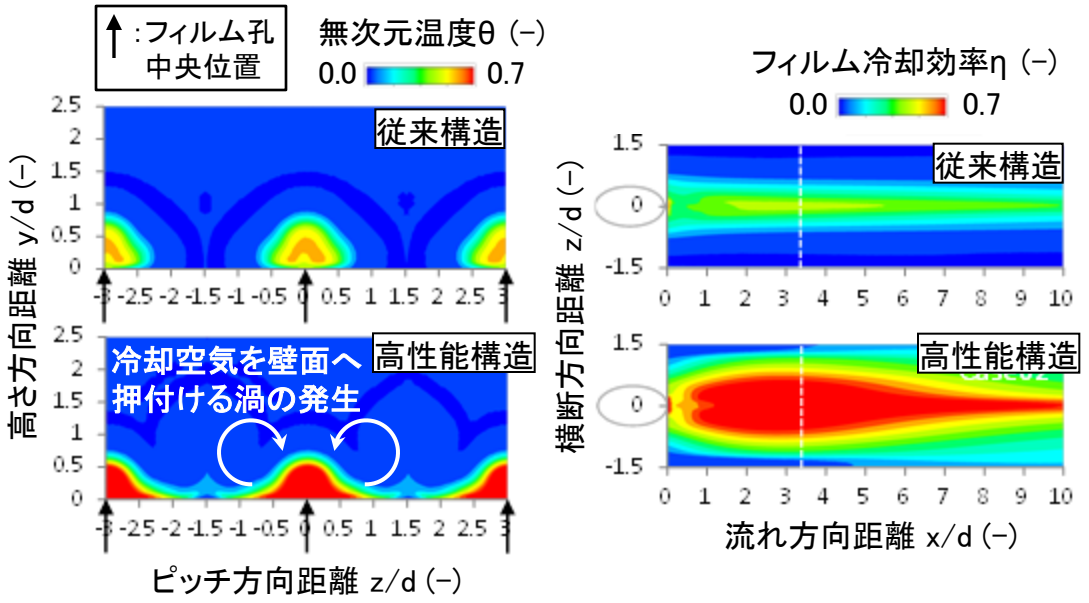


図3　数値流体解析結果（BR=0.5）

$$\theta = \frac{T_g - T_m}{T_g - T_c} \qquad \eta = \frac{T_g - T_f}{T_g - T_c}$$

T_g：主流温度(K)
T_c：冷却空気温度(K)
T_m：混合ガス温度(K)
T_f：断熱壁面温度(K)

$$BR = \frac{\rho_c u_c}{\rho_g u_g}$$

ρ_g：主流密度(kg/m^3)
ρ_c：冷却空気密度(kg/m^3)
u_g：主流流速(m/s)
u_c：冷却空気流速(m/s)

(3) 高湿分冷却翼：タービン内部流れの詳細計測技術の開発

翼周りの複雑な流れ場と温度場、フィルム冷却効率と熱伝達率を計測可能な環状セクター試験装置を設計・製作した。

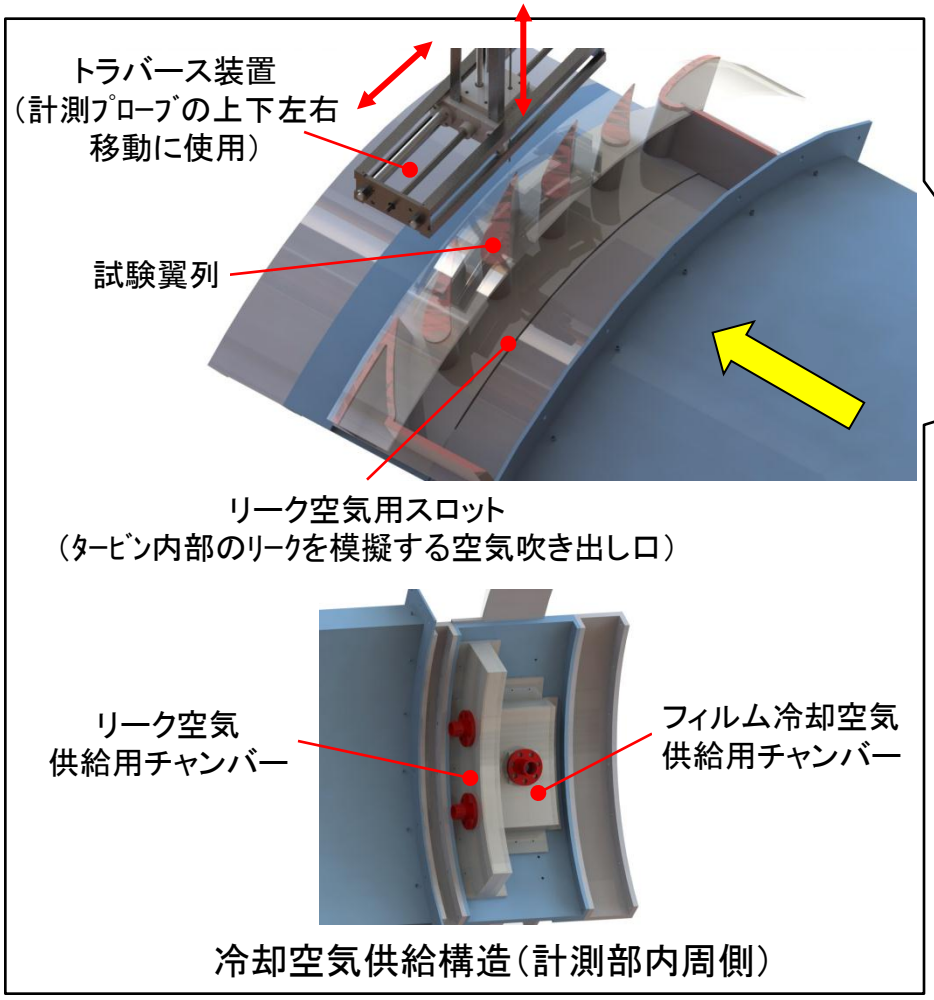


図2 計測部拡大図

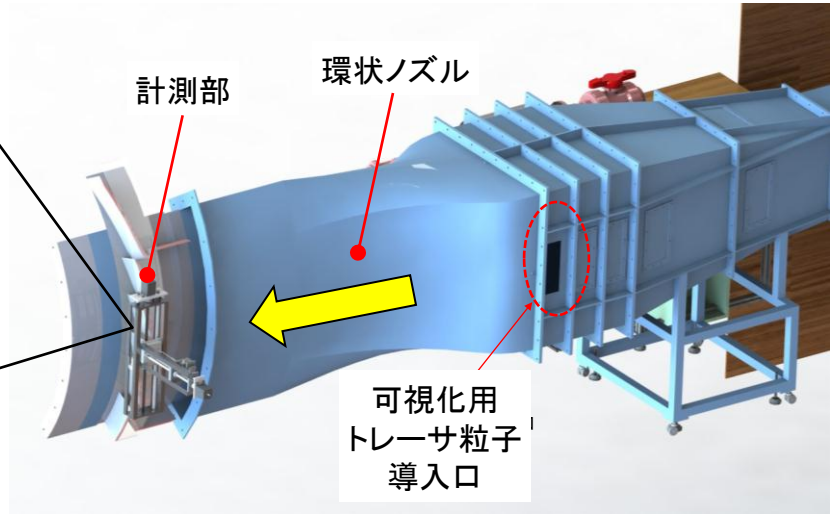


図1 環状セクター翼列試験装置

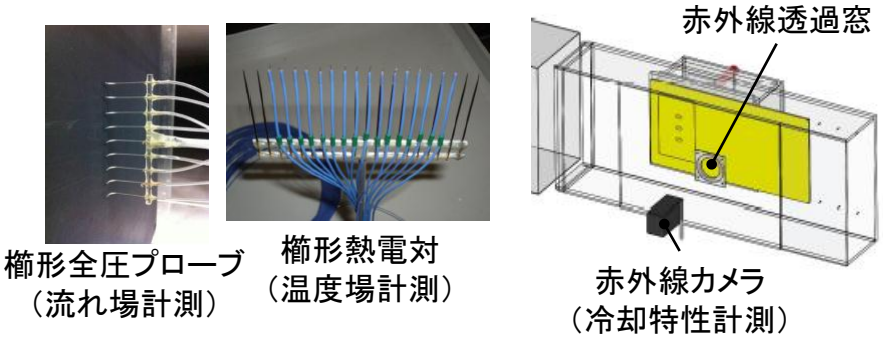
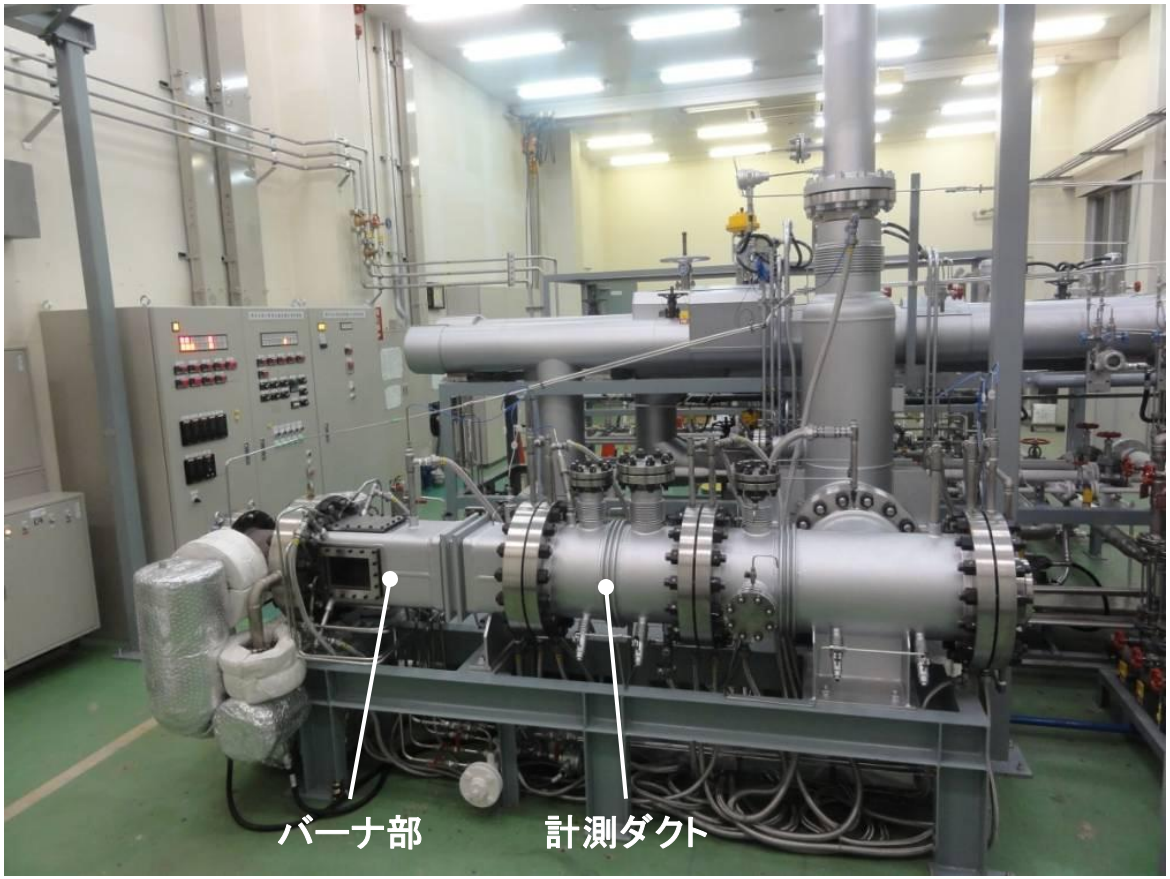


図3 計測装置

(4) 高湿分燃焼器：燃料多様化試験装置の設計、製作

多様化燃料使用時のバーナ燃焼特性を評価するため，模擬燃料（メタン，水素，窒素混合燃料）を燃焼可能な要素燃焼試験装置を開発した。



(4) 高湿分燃焼器：燃焼解析技術の高度化

燃焼試験回数の低減 （多様化燃料の入手，貯蔵，取扱い上の制約）のため，
CO排出量を評価可能な燃焼解析技術を開発した。

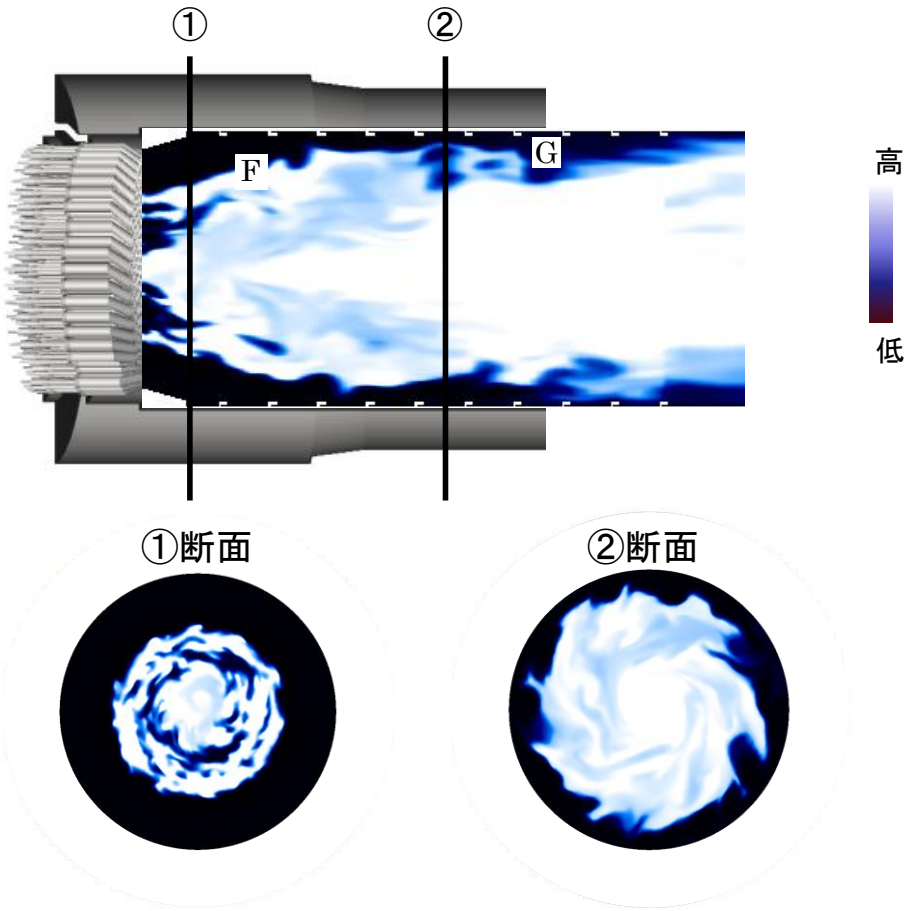


図1　温度分布

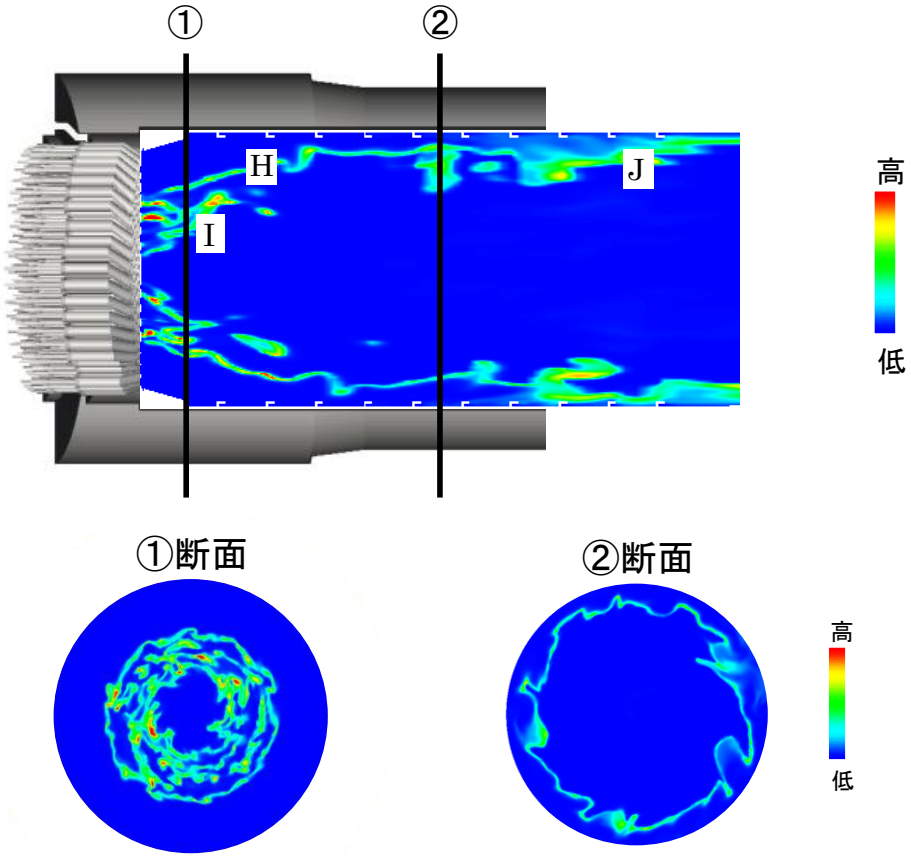
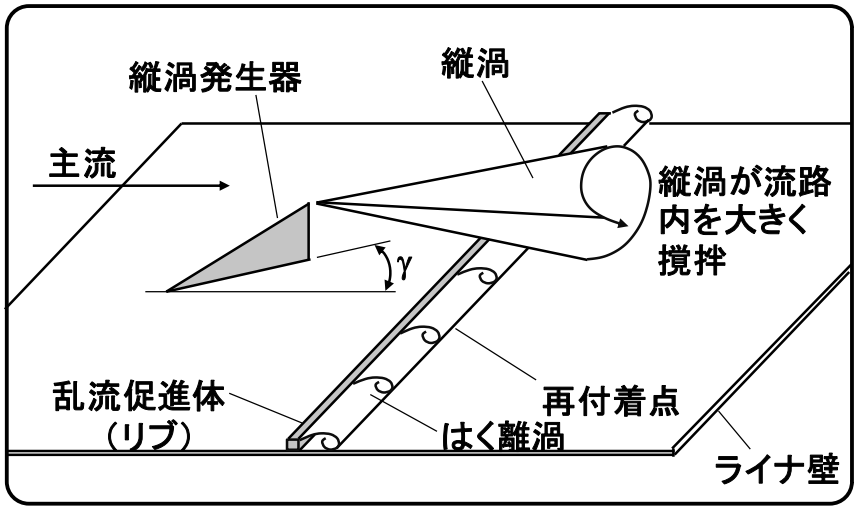
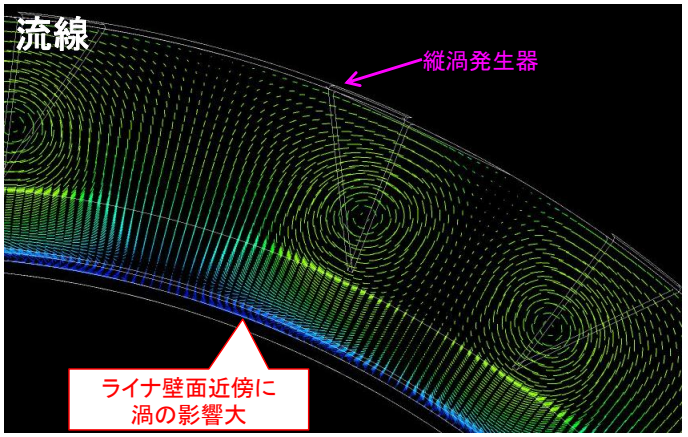


図2　CO濃度分布

(4) 高湿分燃焼器：燃焼器冷却促進構造の検討

冷却空気削減，燃焼空気増加による低NOx化，および入熱量増加に対応可能な対流冷却促進構造を検討するため，縦渦による流路内撹拌効果を検討した。





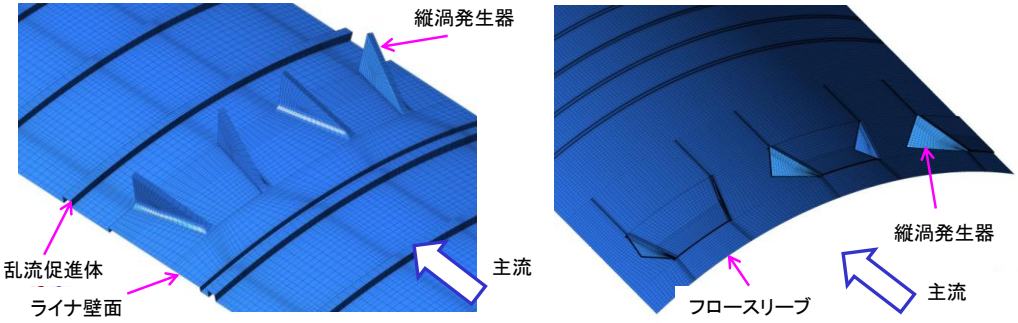


図1　解析形状

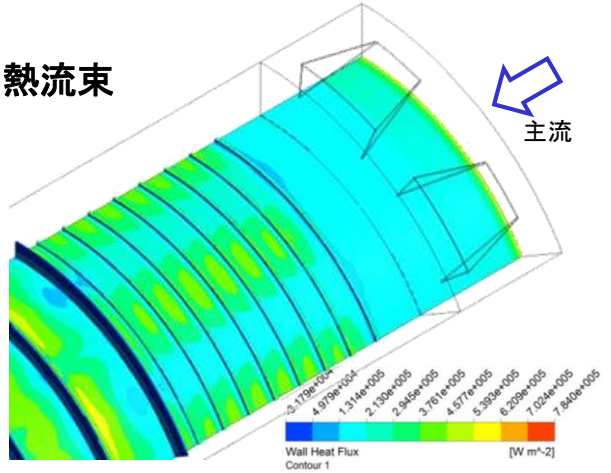


図2　数値解析結果

(4) 高湿分燃焼器：40MW級総合試験

48MW最大加湿条件でNOx排出量24ppmを確認し，総合試験機飽和加湿条件でNOx＜10ppmの見通しを得た。

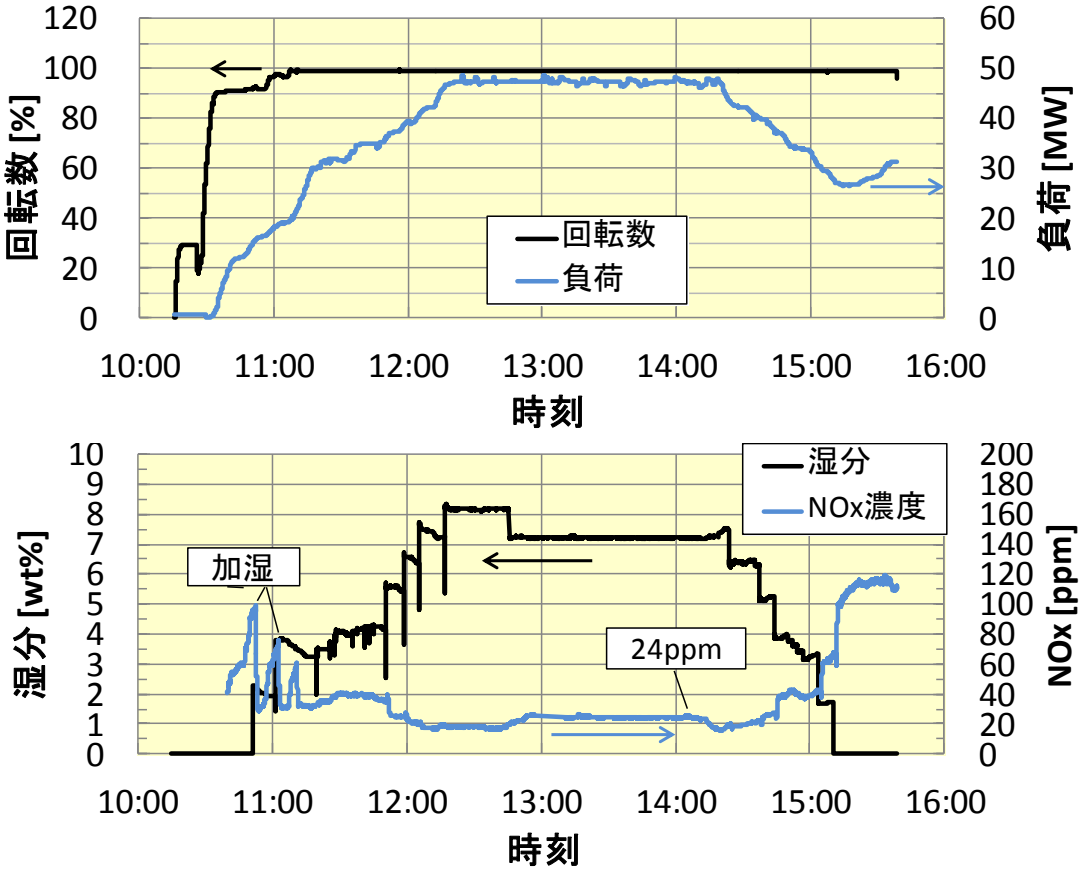
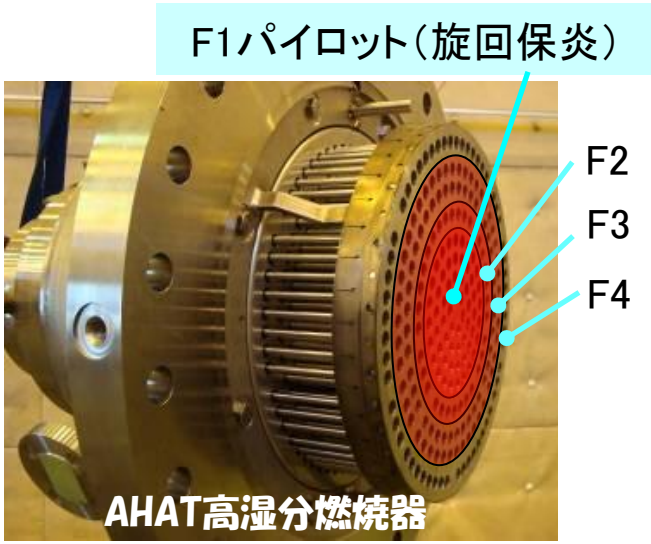


図1　加湿量とNOx排出量



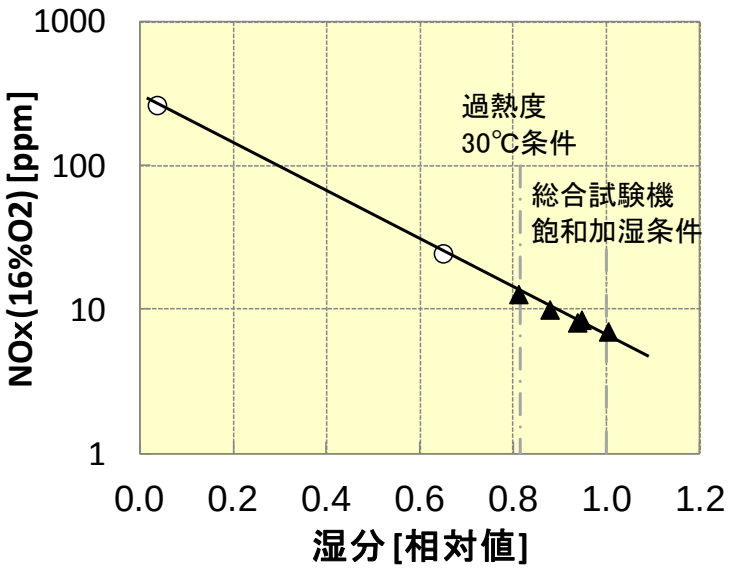
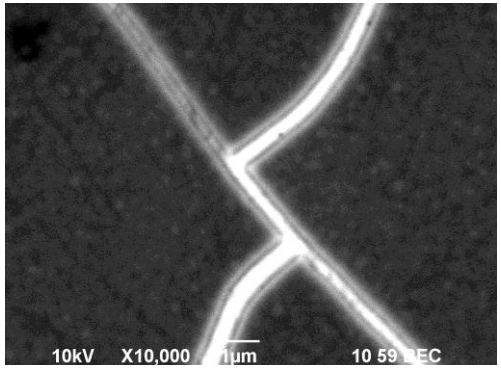


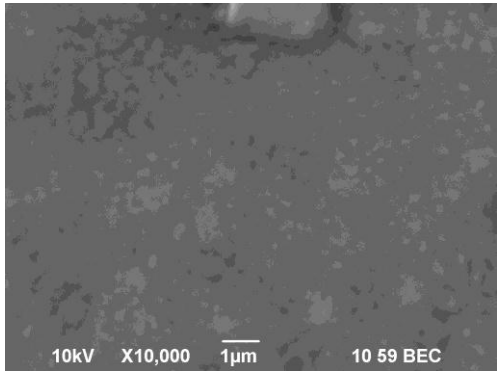
図2　NOxに対する湿分の影響

(5) スケールアップ技術：再生熱交換器の材料面での信頼性確保技術開発

成膜の安定と改良を検討し、キレート剤※1の添加と液の攪拌により、LPD法※2による酸化皮膜のクラック発生を低減した。熱交換器内面へ表面処理を行うことにより材料面での長期信頼性向上が期待出来る。



(a) キレート剤なし(攪拌)

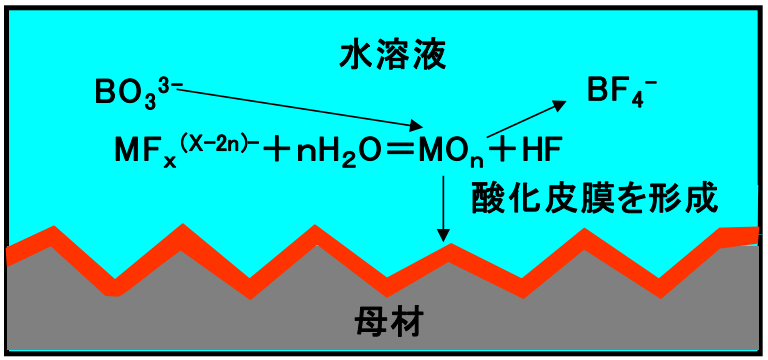


(b) キレート剤あり(攪拌)

図 LPD法による酸化皮膜の比較

※1 キレート剤：金属イオンに対して複数の結合を形成して金属イオンを挟み込むような形で結合する薬剤。
金属封鎖剤，変質防止剤として洗剤，化粧品等への添加、重金属処理やメッキ処理等に利用 。

※2 LPD法：金属フッ化物（金属フルオロ錯体）の加水分解反応（析出反応）と、アルミ、ホウ酸などのフッ素イオン捕捉反応（析出駆動反応）を利用して酸化物膜を析出させる反応。



図：LPD法のメカニズム

(5) スケールアップ技術：再生熱交換器の構造面でのスケールアップ技術開発

●熱交換器本体コアの溶接接続を行うのに最適な条件（材質、寸法等）の検討を行い、組合せにより最適条件が異なるが3mmのスペースを空けることで接続部の溶接品質を健全と出来ることが分かった。
●この結果、熱交換器本体高さを従来の2000mmから3000mmへスケールアップすることで増加するコア溶接接合部分の信頼性向上を図ることが出来た。

表　コア接合溶接試験結果
（SUS310Sの例）

SUS310S		スペーサー厚さ t (mm)		
		2	3	5
スペーサー深さ D (mm)	2	○	○	△
	3	○	○	△

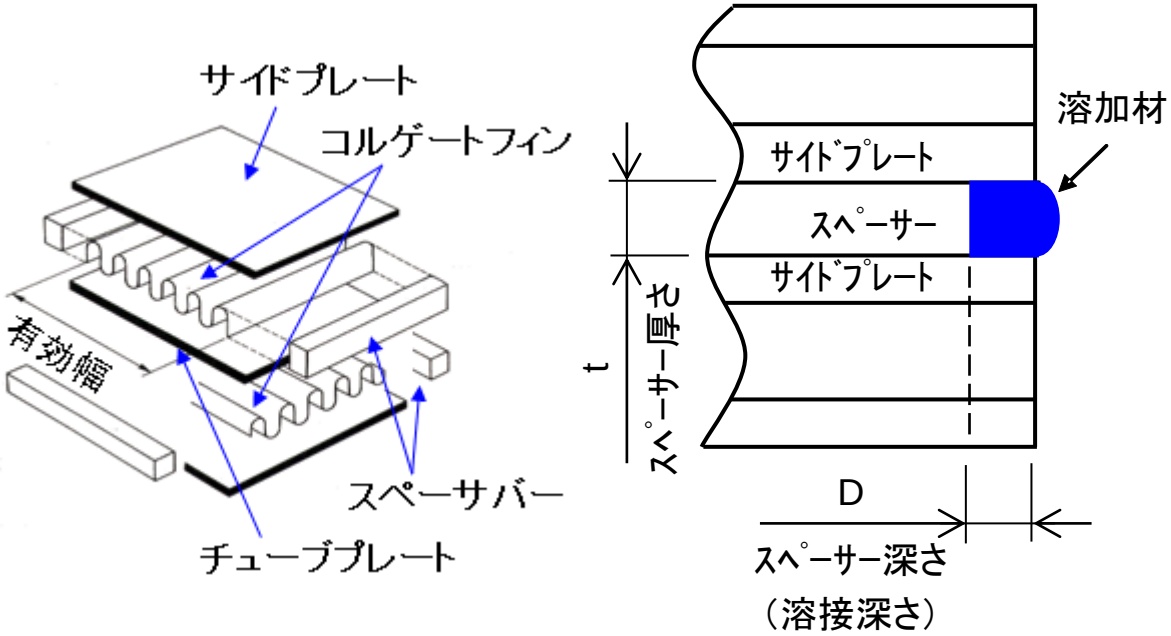
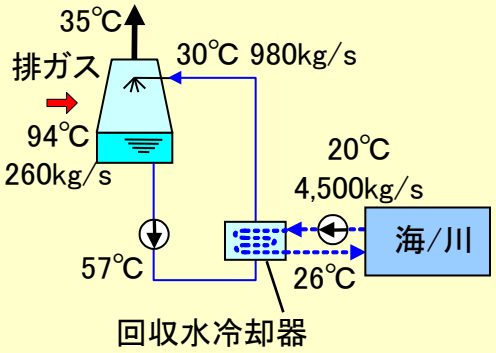
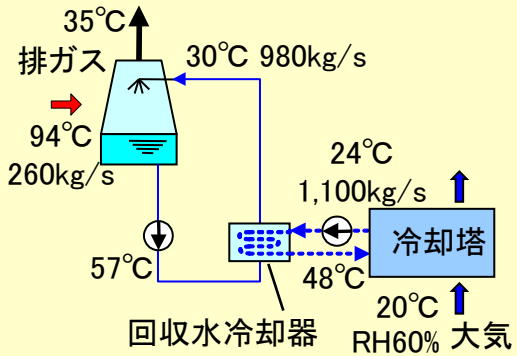
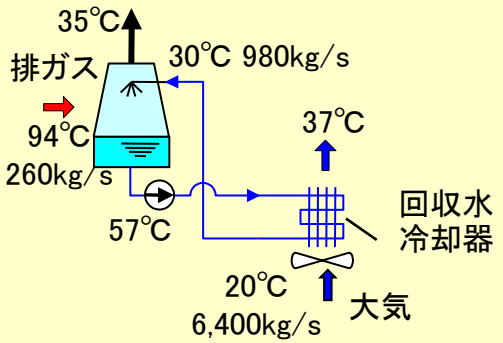


図　プレートフィン式熱交換器とコア接続溶接部開先形状

(5) スケールアップ技術：水回収装置の冷却方式の検討

水回収装置の冷却に空冷式を採用した場合、熱交換器の伝熱面積が大きく発電コストも若干上昇するが、海水や工業用水が不要であり内陸部に立地可能なメリットが大きい。

表　水回収装置の冷却方式比較（出力150MW想定）

冷却方式	(a) 海水/河川水	(b)冷却塔	(c)空冷（ラジエータ）
メリット	・冷却水補給不要	・温排水不要	・冷却水補給不要 ・内陸設置可
デメリット	・取水源、取水工事要 ・取放水温度差制限	・蒸発、飛散水補給要 ・水質調整、排水処理要	・伝熱面積(設置面積)大
構成			
伝熱面積	3,300 m²（プレート面片面）	8,400 m²（プレート面片面）	28,000 m²（チューブ内面）
熱交コスト	0.37 k¥/kW	0.93 k¥/kW	7.16 k¥/kW
所内動力	0.026 kW/発電kW （スプレイ水ポンプ：840kW 循環水ポンプ：3,100kW その他：290kW）	0.016 kW/発電kW （スプレイ水ポンプ：840kW 循環水ポンプ：770kW 空冷ファン他：1,020kW）	0.021 kW/発電kW （スプレイ水ポンプ：840kW 空冷ファン：2,140kW その他：420kW）
発電コスト*	ベース	−0.07 ¥/kWh	＋0.17 ¥/kWh

*機器コストと所内動力の影響による増減のみを評価

(5) スケールアップ技術：水回収試験装置の目的と概要

●大型化に適した充填物式の検証のため、40MW級総合試験装置の排気ダクトに、約1/60規模の水回収装置を追設した。
●放熱は空冷式であり、内陸立地への適用性を検証可能である。

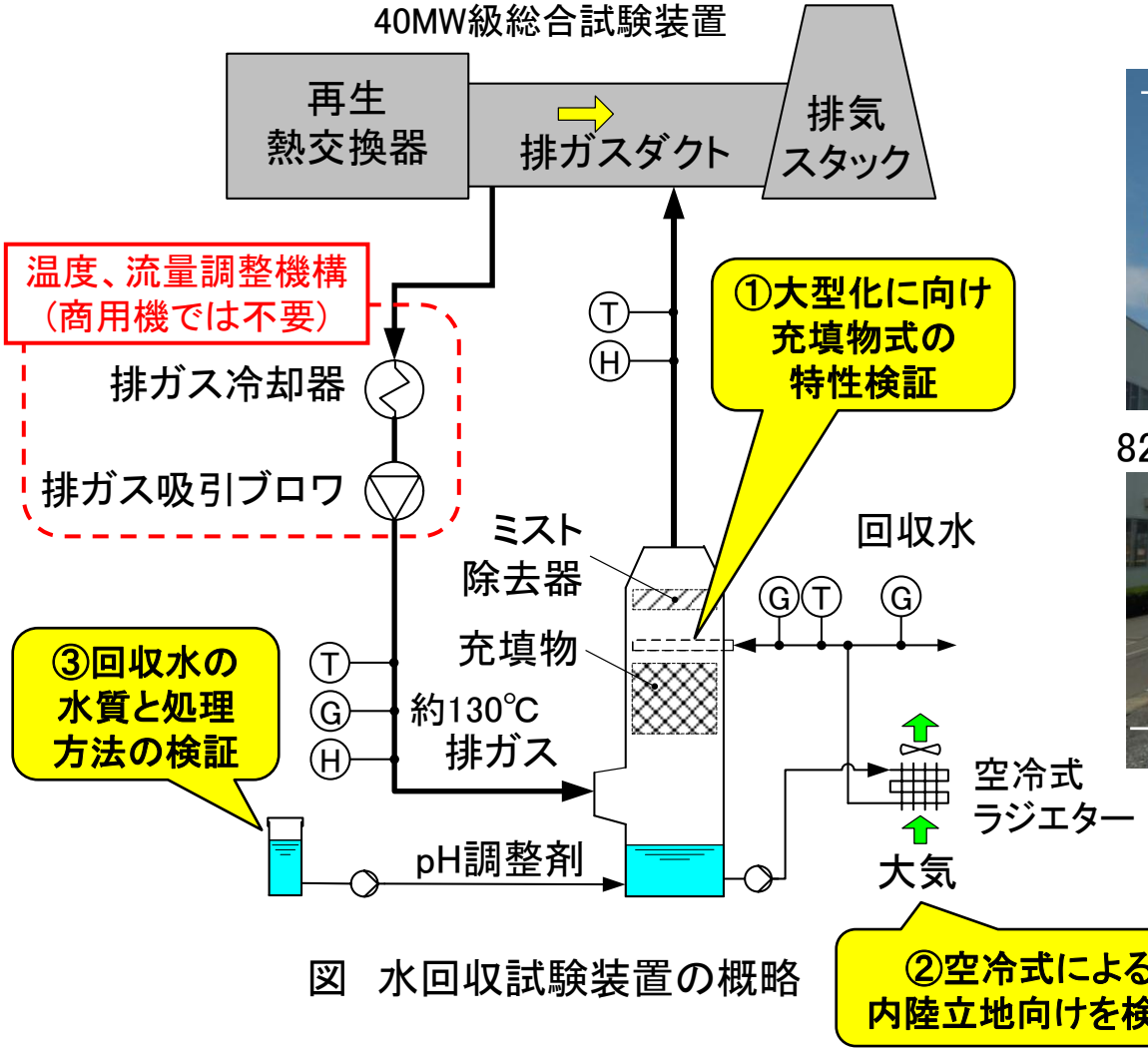


図　水回収試験装置の概略

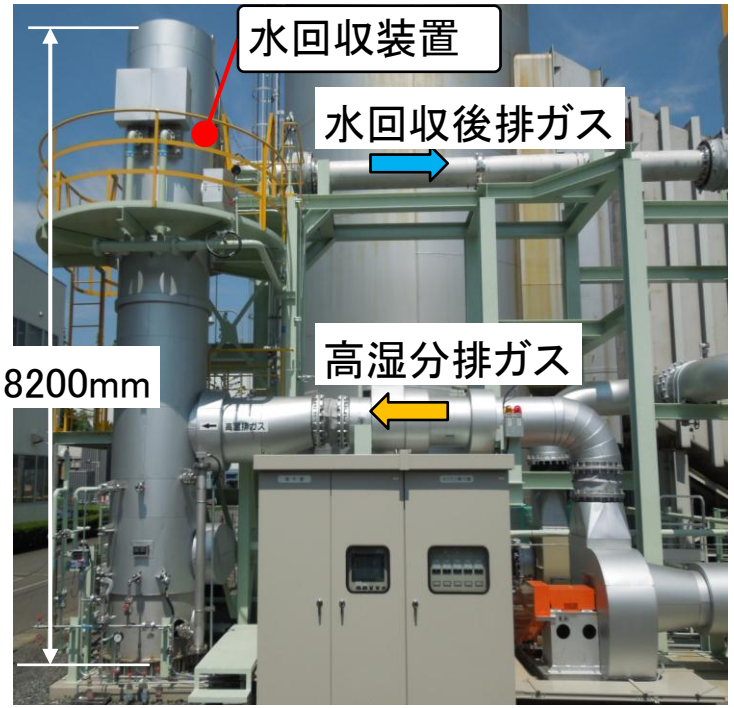


図　水回収試験装置の外観

(5) スケールアップ技術：水回収試験装置の測定結果

●回収量の測定結果は、熱・物質移動モデルによる予測値の約97%であり、充分な精度で水回収装置の性能予測が可能
●ガスタービンへの加湿量に対して、100%以上の湿分を回収でき、外部からの補給水を大幅に低減できる見通し

表　回収水量の測定結果、解析との比較、加湿量との比較

ケース名			C1	C2	C3	C4	備考
ガスタービン	出力	MW	22	25	43	51	
	加湿量 (WAC蒸発量+加湿管蒸発量)	g/kg'	57	65	72	74	排ガス絶対湿度基準
水回収装置 散布水	流量	kg/s	7.7				
	温度	℃	33		38		
水回収装置 排ガス入口	流量	kg/s	2.2		2.1		全ガス量の約1/60
	温度	℃	125		130		エコノマイザ出口想定
	絶対湿度	g/kg'	93	104	117	124	
測定結果	測定結果 (排ガス絶対湿度基準)	g/kg'	60	69	70	79	
熱・物質移動 モデルによる 予測結果	予測結果 (排ガス絶対湿度基準)	g/kg'	61	71	73	82	
	回収量の実測/予測	%	98%	97%	96%	96%	平均97%
加湿量との 比較	回収割合 (回収量 / 加湿量)	%	104%	105%	97%	106%	平均103%

(6) 40MW級総合試験：総合試験の目的

- 高湿分ガスタービンの構成機器の健全性確認
- 実証機の性能予測

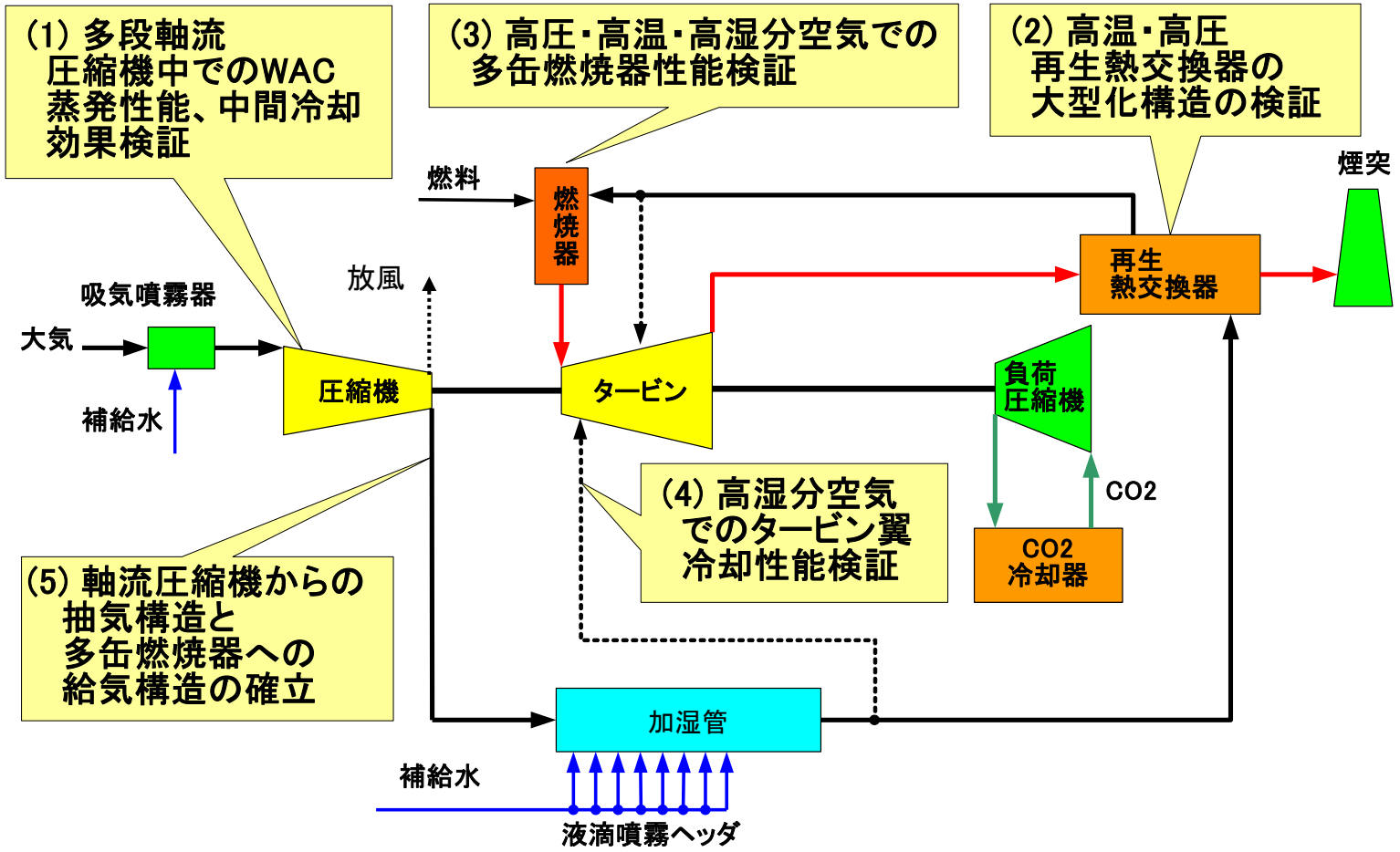


図　40MW級総合試験装置の構成と主な検証内容

(6) 40MW級総合試験：40MW級総合試験装置の外観

- スプレイ式の加湿管により、圧縮空気への加湿量を変化可能
- 圧縮機吐出空気をプラント側に抽気するガスタービンケーシング構造も検証する

図　システム機器

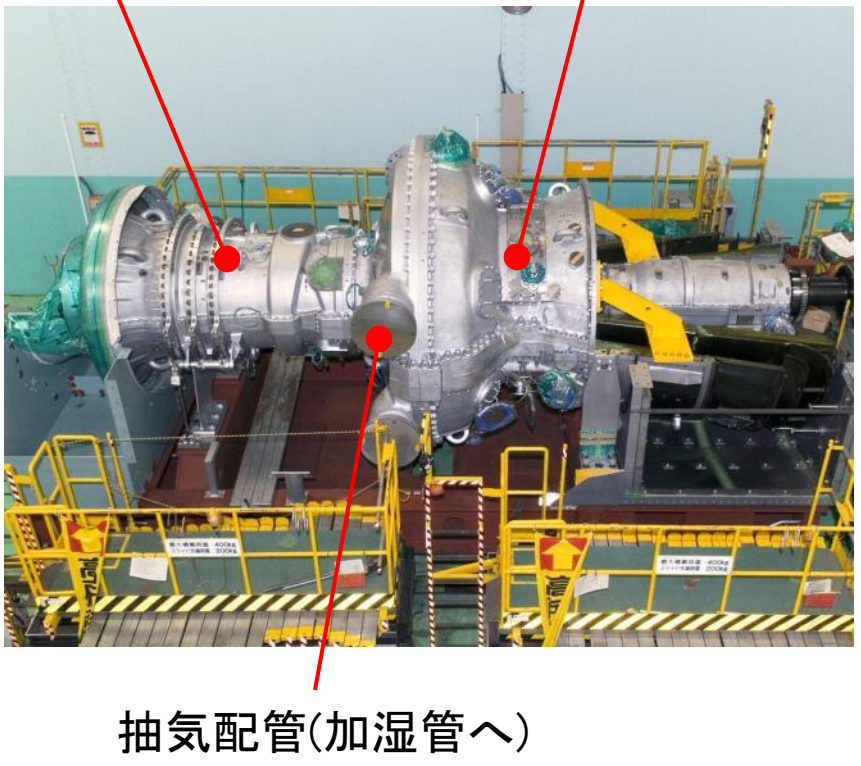
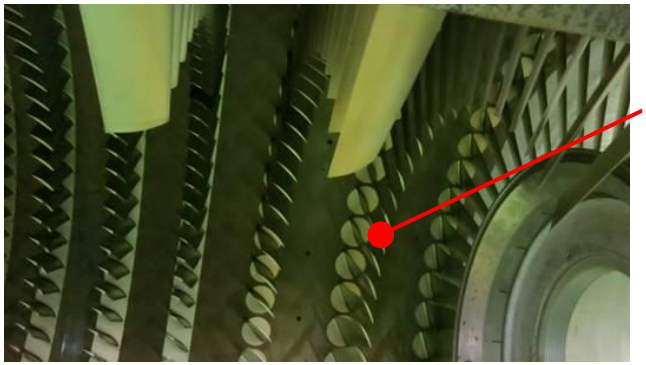
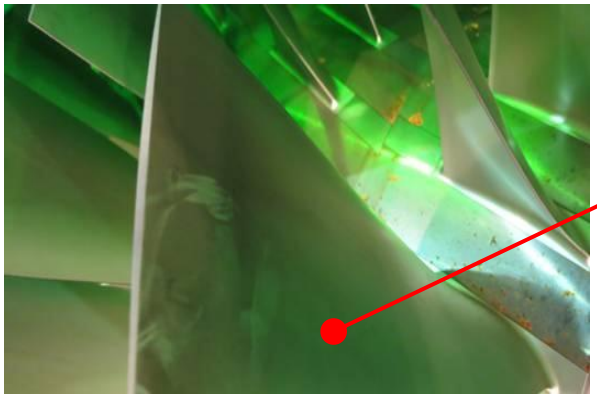


図　ガスタービン本体

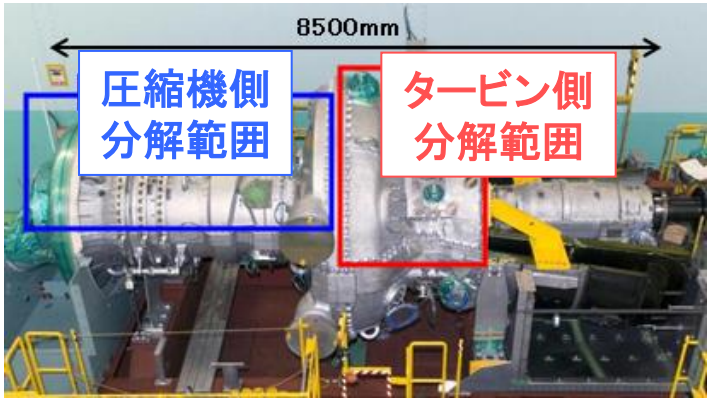
(6) 40MW級総合試験：ガスタービン本体内部開放点検

ガスタービン内部開放点検の結果、加湿運転や過度な温度上昇による損傷は確認されず、健全性に問題無いことを確認した。

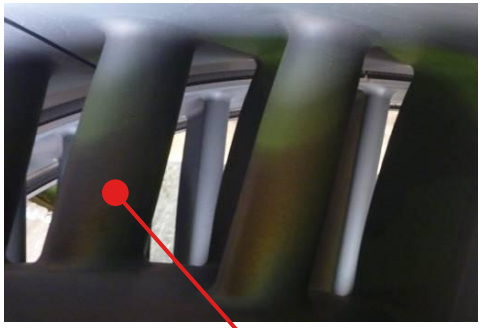




圧縮機側内部（静翼・動翼）



内部点検の分解範囲



静翼　動翼

タービン側内部（静翼・動翼）

(6) 40MW級総合試験：定格出力への到達

●開放点検後に装置復旧し、38回の起動、累計50時間の運転実施した。
●45MW、48MW出力でヒートランを実施、重構造GTのAHATへの適用性を確認した。
●コールド状態で燃焼器点火から定格負荷の40MW到達まで約60分、GTCCの約1/3に相当する。

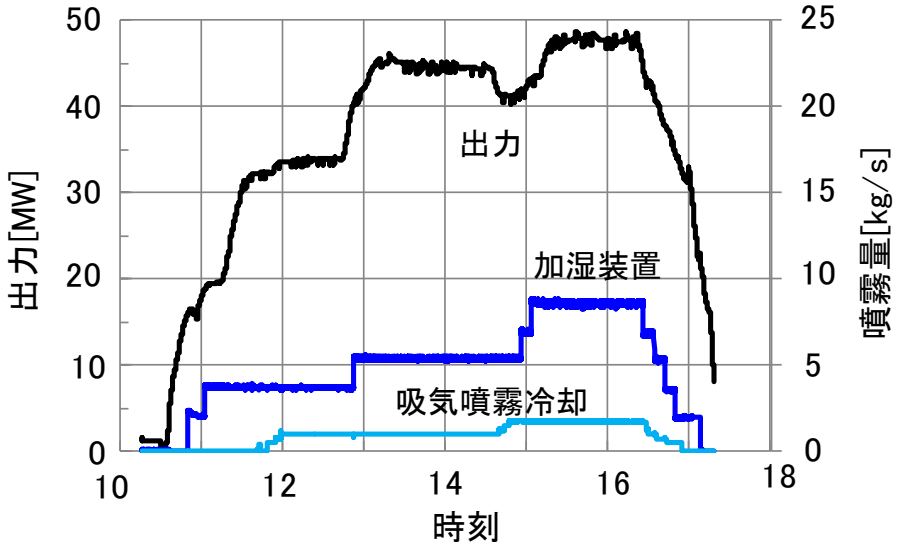


図　初めて定格負荷を達成した日の運転曲線(2012年12月4日)

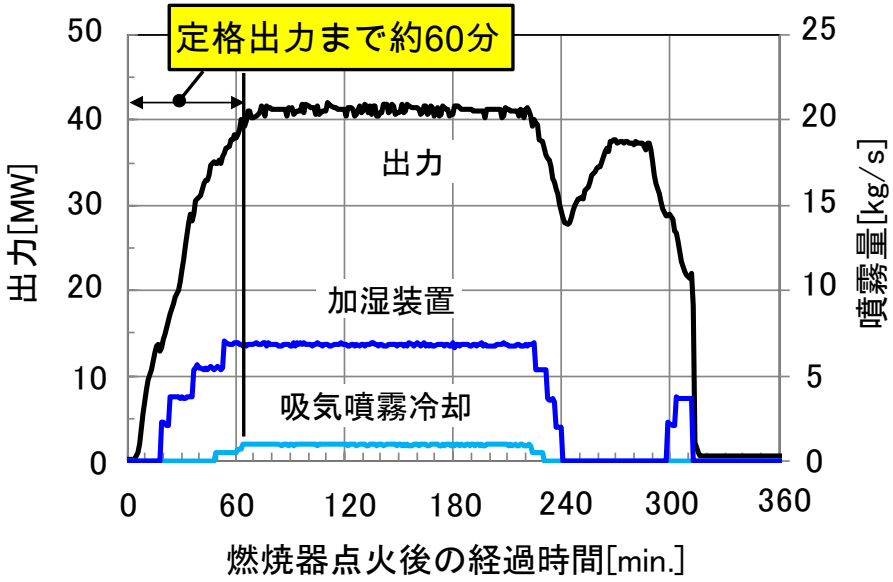
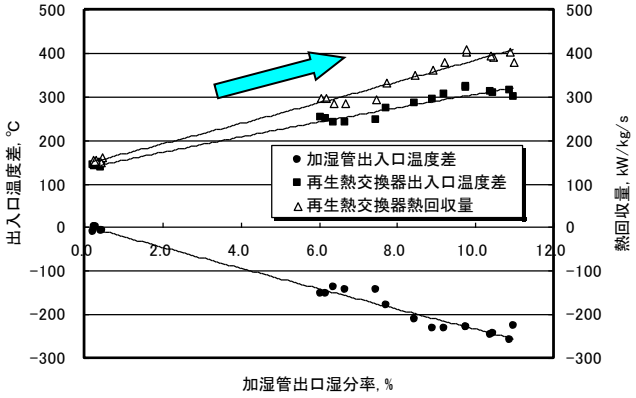


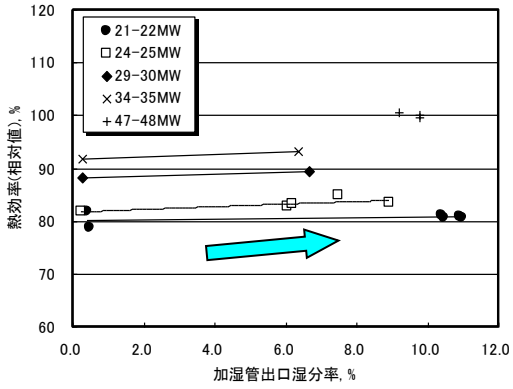
図　コールド状態からの起動特性を示す例(2012年12月13日)

(6) 40MW級総合試験：データ検証

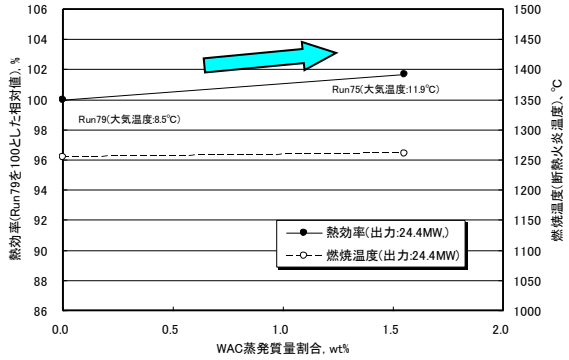
- ●加湿により排熱回収量増加し、各負荷で熱効率が向上することを確認した。
- ●吸気水噴霧により圧縮動力が低減され熱効率が向上することを確認した。
- ●吸気流量による負荷制御により、高い部分負荷特性が得られた。



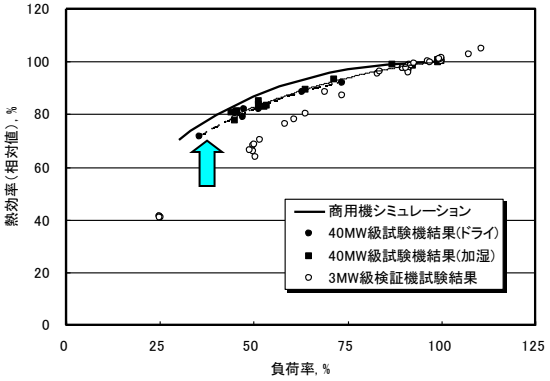
(1) 加湿による再生熱交換器での熱回収量の変化



(2) 加湿による各負荷での熱効率の変化



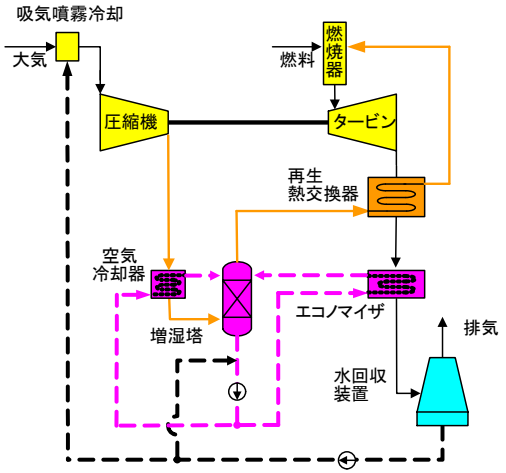
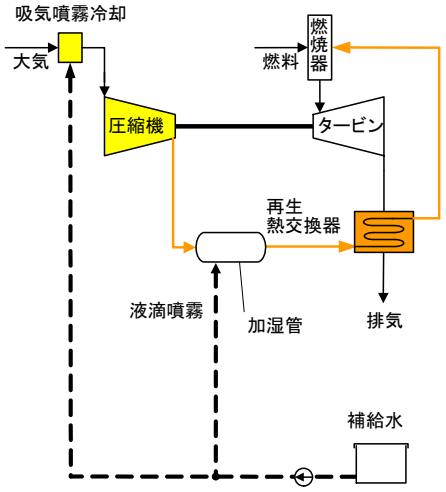
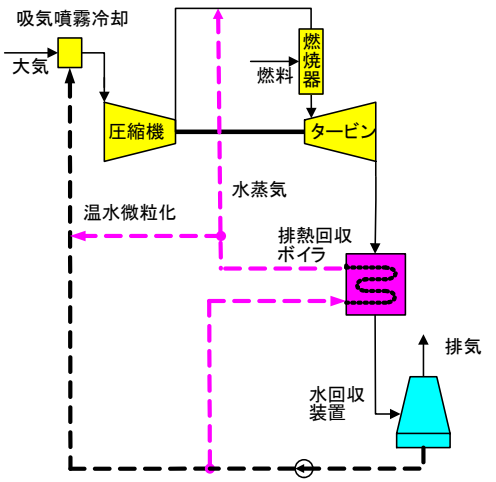
(3) 吸気水噴霧による熱効率の変化



(4) 部分負荷特性の比較

(7) 実証機試験：実証機の形態の検討

日本再興戦略(内閣府、H25年6月)における、火力発電の開発加速に対応し、既存40MW級総合試験装置を改造した二段階実証による実証の前倒しを検討した。

システム構成		AHATフルシステム	実証機の計画(二段階実証) 第一実証 (ガスタービン構造、再生サイクルの実証)	実証機の計画(二段階実証) 第二実証 (全量加湿、全量水回収の実証)
系統構成				
実証内容(網掛)	(A)高湿分ガスタービン	圧縮機	高湿分圧縮機、吸気噴霧冷却	高湿分圧縮機、吸気噴霧冷却
		タービン	(加湿量約半分)	全量加湿条件
		燃焼器	(加湿量約半分)	全量加湿条件
	(B)再生サイクル	再生サイクル配管	全量抽気構造	–
		再生熱交換器	全量熱交換	–
	(C)加湿	全量加湿	(加湿量約半分)	全量加湿
	(D)水回収	全量回収	(ガス量約1/60)	全量回収
実証の実現方法		電気事業者、産業用ユーザーの参画が必要 (開始時期未定)	本事業の40MW級総合試験装置で実証可能 (～H27まで実証完了可能)	・本事業の40MW級総合試験装置を改造すれば早期に実証可能(H28～建設開始) ・電気事業者、産業用ユーザーの参画でも早期に実証可能(H28～建設開始)

研究開発成果 :学会表彰、論文、特許等の出願・発表状況

●学会で高い評価を受け、海外で4件、国内で2件、学会から表彰※されている。

●3MW級検証機、40MW級総合試験装置は、国内外の多数の顧客に視察頂き、ユーザーに関心を持たれている。

※主な学会表彰
・ASME Turbo EXPO, J. P. Davis Award (2010年6月)
・ASME Turbo EXPO, Best Paper Award (Cycle Innovation 部門) (2009年6月)
・日本ガスタービン学会 技術賞(2008年4月)

	要素技術開発				実用化技術開発				技術実証事業		
年度 / 項目	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	合計
論文・解説	0	2	1	2	3	3	4	8	3	1	27
特許(公開)	3	10	12	7	8	11	6	6	10	3	76
国際会議発表	1	2	1	2	4	1	1	6	1	6	25
国内会議発表	2	0	5	7	5	1	3	1	5	11	40

5. 事業化、波及効果

事業化(商用化)の計画

●本事業の前半で計画している高信頼性化要素技術の開発後に、実証機の建設、運転により、AHATシステムの長期信頼性を評価し商用機につなげていく必要がある。

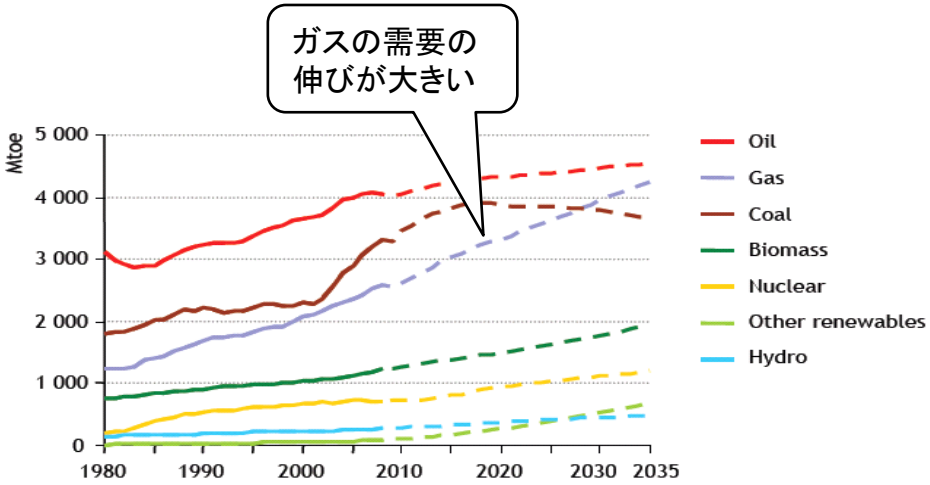
●本技術の一部は既に製品に適用済であり、ガスタービンの高性能化に寄与している。

項目＼年度	2000	2005	2010	2020～
技術開発	要素技術開発（'04～'06年） 1/30規模の装置でAHATシステムの原理的な成立性確認。 （3MW級検証機）	実用化技術開発（'08～'11年） 1/3規模の装置で中容量AHATシステムを実現するためのガスタービンに関わる要素技術を開発。 （40MW級総合試験設備）	技術実証事業（'12年～） 高信頼性化技術の開発とAHATシステムの長期信頼性実証。 （実証機）	商用機（'20年～）
技術開発の成果、波及		・高湿分翼冷却翼技術 ・高湿分燃焼器技術 →日立ガスタービンに適用		・リプレース ・系統調整電源 ・海外分散電源
次世代発電技術への展開			CO2回収型クローズドサイクルAHAT	CO2回収型IGHAT

ガス火力発電の今後の見通しと市場規模

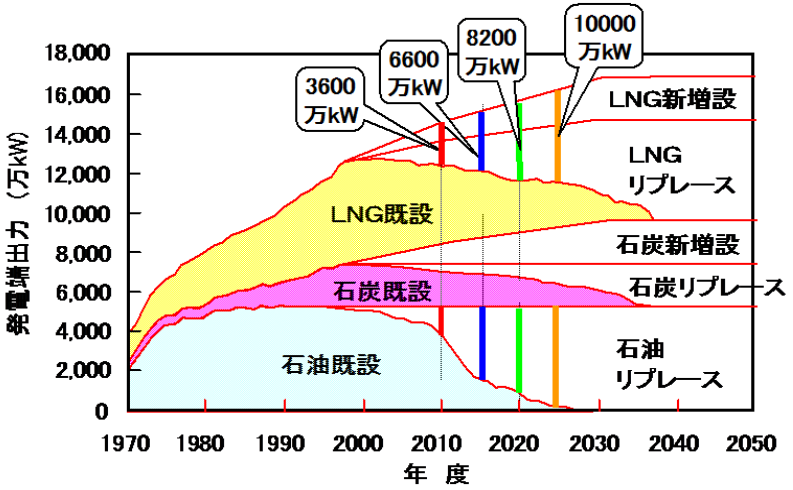
●シェールガスなど非在来型ガスの掘削技術が開発され、天然ガスは世界的な需要拡大が見込まれる。

●LNG火力発電のリプレース潜在需要は、2020年に約8,000万kWと見込まれ、これらの国内リプレース市場にAHATを導入していく。



世界エネルギー需要予測

出典：IEA World Energy Outlook (2011)



日本における電源構成の推移推定例(寿命40年)

出典：電力中央研究所「第18回ｴﾈﾙｷﾞ未来ﾌｫｰﾗﾑ」(1999)

AHATのセールスポイントとユーザーのメリット

●中小容量クラスでは、欧米メーカーが技術的に先行し、販売シェアを占めている。
●独自の高湿分空気利用によるセールスポイントを付加して、事業化する。

比較項目		AHAT（目標）		GTCC(ガスタービンコンバインドサイクル)	顧客ターゲットとメリット
効率	発電効率	○	200MW以下の同出力レベルでGTCCと同等以上	ベース	・日本、欧米：CO2削減による環境保全 ・アジア、欧州：ランニングコスト低減による経済性向上
運用性	起動時間	◎	ホット起動：30分 コールド起動：60分 （蒸気タービン無）	ホット起動：60分 コールド起動： 180分 （蒸気タービンの暖機必要）	全地域：再生可能エネルギーとの連携（負荷変動への対応）
	負荷変化率（時間あたりの出力の変化率）	◎	ガスタービン単独の場合と同等（10%/min程度）	蒸気タービンの負荷変化率に依存（5%/min程度）	
環境性	NOx（窒素酸化物）排出濃度	○	脱硝装置無しで10ppm以下（高湿分燃焼）	脱硝装置必須	日本、欧米：低NOx排出による環境保全
	立地の自由度	◎	水回収装置の空冷化が比較的容易、内陸部にも設置可能 伝熱面積：50%	蒸気タービンの復水器の空冷化は伝熱面積大きく、臨海立地向き 伝熱面積：100%	・日本：自治体、事業者向けリスク回避型分散電源(内陸立地) ・中東、アフリカ、欧米：内陸部、グリッド未整備地域へ中小容量分散電源
経済性	機器コスト	◎	蒸気タービン系無しのため、GTCC以下	ベース	全地域：イニシャルおよびランニングコスト抑制による経済性(ライフサイクルコスト)最小化
	建設期間	○	蒸気タービン系無しのためGTCCより短工期	ベース	
	水消費	○	水回収により、補給水ゼロも可能	排熱回収ボイラのブロー水の補給	渇水地域：高効率発電プラントを導入により、環境保全、経済性向上

事業化戦略

●国内は、LNG火力リプレース、石油火力の燃料転換等のリプレース市場と、エネルギーセキュリティー確保を目的とした自治体、発電事業者のユーザーに導入提案する。

●海外は、欧米など再生可能エネルギーの導入が多い地域の他、立地の自由度のメリットを生かし、中東、西アジア、アフリカ等の内陸部、グリッド未整備地域を中心に導入提案する。

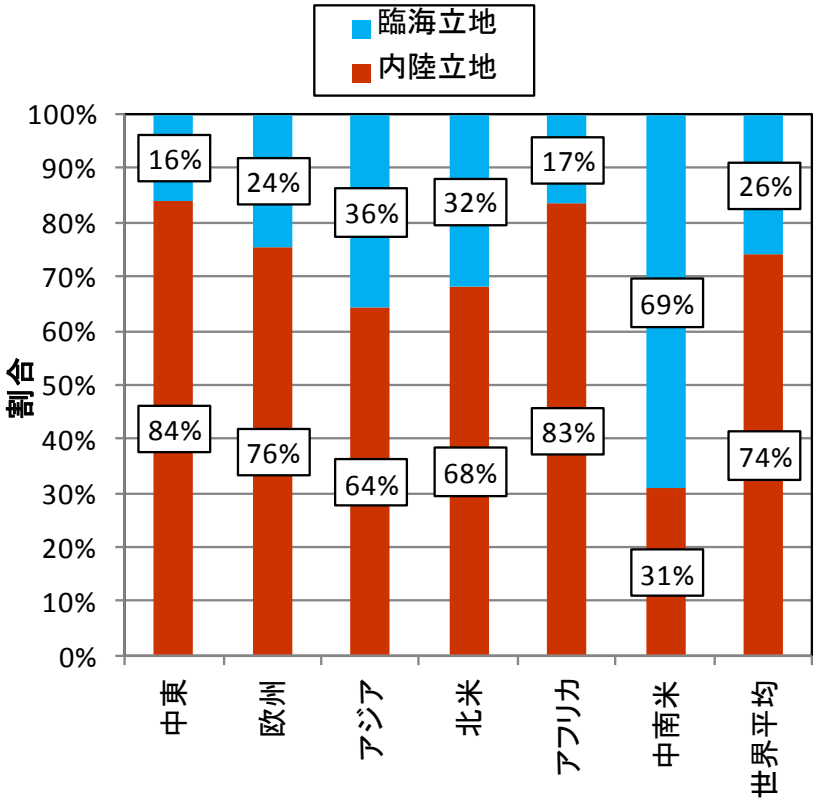


図　ガスタービン発電設備の地域別立地点
（2010年運開分、出典：日立製作所）

表　ターゲット市場と戦略

No.	市場	特徴	戦略
1	国内	・再生可能エネルギーとの連携ニーズ大 ・震災以降、エネルギーセキュリティー確保を目的とした分散電源のニーズ	・LNG火力リプレース、石油火力の燃料転換などのリプレース市場のユーザーに提案する ・内陸立地の分散電源の案件を狙う
2	欧米	再生可能エネルギーとの連携ニーズ大	起動時間、負荷変化率のメリット生かし再生可能エネルギーとの連携向けを狙う
3	中国、東南アジア	・中国の内陸部の発展 ・高気温	・内陸立地の分散電源の案件を狙う ・高気温地域に、出力低下が少ない点をアピールする
4	中東、西アジア、アフリカ	・高気温 ・水が乏しい ・グリッド未整備地域多い	・高気温地域に、出力低下が少ない点をアピールする ・水が乏しい地域に、補給水が少ないまたは不要な点をアピールする ・グリッド未整備の内陸立地の分散電源の案件を狙う

6. 研究開発マネジメント・体制等

プロジェクト遂行スケジュール

各項目とも予定通り進捗している。

計画
実績

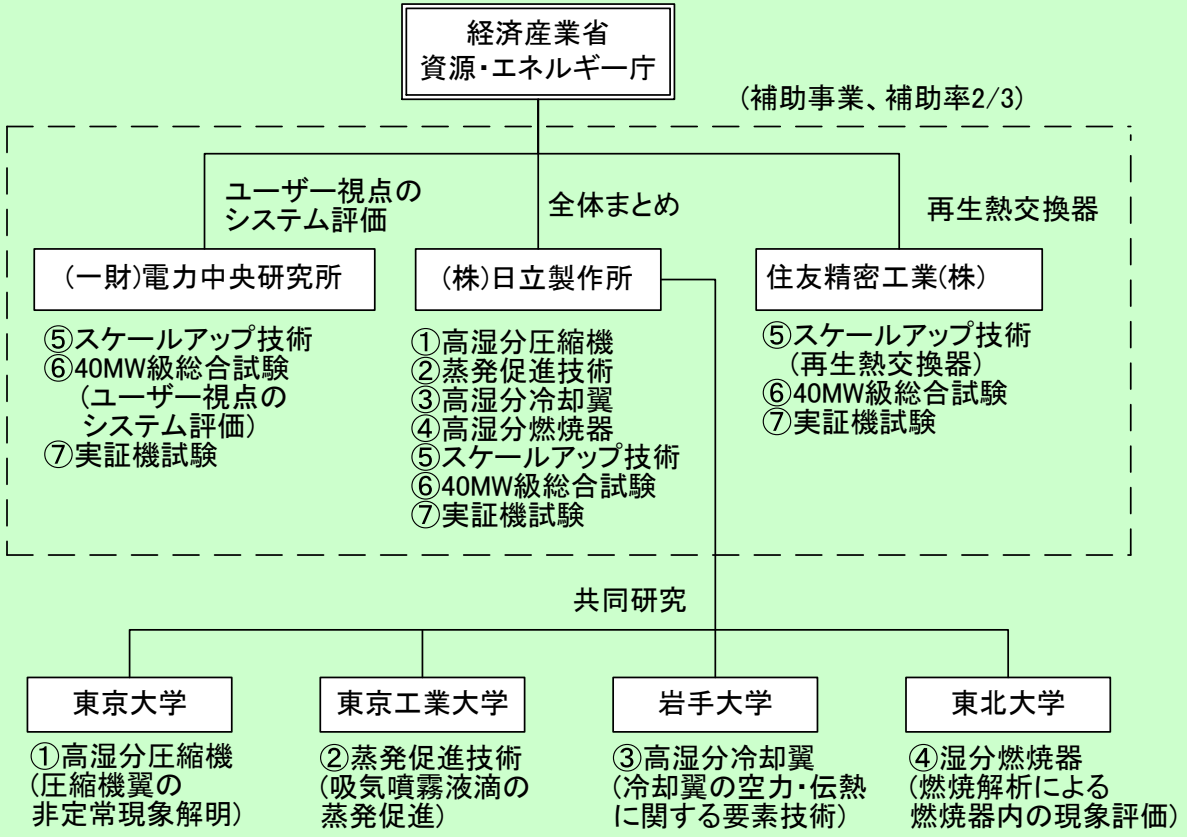
	項目(担当)/年度	H24	H25（現在）	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32	
高信頼性化要素技術	(1)高湿分圧縮機（日立）	高負荷対応三次元翼				要素試験（産学連携による研究開発含む）					
	(2)吸気噴霧液滴の蒸発（日立）	吸気噴霧液滴の蒸発促進技術									
	(3)高湿分冷却翼（日立）	主流ガス熱負荷低減技術									
	(4)高湿分燃焼（日立）	燃料多様化、バイオ燃料燃焼技術									
実証機	(5)スケールアップ技術（日立、住精、電中研）	再生熱交換器の大型化									
		水回収装置の大型化									
	(6)40MW級総合試験装置による検証（日立、電中研、住精）（二段階実証の１/２）	開放点検	試験	Tip Cut改造	試験	設計開始時期を1年前倒しし、早期実用化を目指す					
		実証機、商用機の性能予測									
	(7)実証プラントによる長期信頼性の実証（日立、電中研、住精）			試設計	設計	製作			試験・検証		合計
					（二段階実証の２ /２）						
予算（事業総額、百万円）		1,072	1,609	1,329	828	5,462	12,318	4,280	15,255	15,255	57,407

二段階実証の場合、早期に実証完了が可能

体制

● 本事業は、㈱日立製作所が全体まとめを担当、(一財)電力中央研究所はユーザーの視点に立ったシステム評価、住友精密工業㈱は再生熱交換器のスケールアップ技術を担当し、それぞれの実施者の専門技術を最大に発揮できる3社連携の協力体制で実施している。

● 国内の4つの大学(東大、東工大、岩手大、東北大)との共同研究により、大学が有する最新の理論、技術、設備を活用し、本開発を加速しつつ、国内の大学の研究水準向上に寄与する。



7. 事前評価の結果

No.	事前評価報告書(平成23年7月、評価小委員会)における提言、指摘事項	対応方針、対応状況
1	商用化には、目標の発電効率達成のための技術確立だけでなく、長期信頼性、経済性、メンテナンス性等も大きな要素となる。これらについても、数値目標を明確にして技術開発を進めることが望ましい。また、長期信頼性を検証するために、実証試験の運転時間は十分に取る計画にすることを提案する。	長期信頼性、経済性、メンテナンス性等については、コンバインドサイクに比べて同等以上を目標としている。早期実用化と信頼性確保を両立するのに必要な運転時間を検討中である。
2	ユーザ視点の改良が重要であるが、中小容量機においてはユーザが大手電力会社とは限らないので、自家発電ユーザなどの多様な潜在市場のニーズを取り込む工夫が必要である。	電力だけでなく、自家発電ユーザにPRを進めている。潜在市場として、国内外の内陸部、水不足地域のニーズの掘り起こしを進めている。
3	震災後の発電容量の不足について対応する観点からは、既設ガスタービンの出力向上の緊急性が高いと考えられるが、これまでの事業で開発された技術について既設ガスタービンへの適用が可能であれば、その方策について検討することも重要である。	高湿分燃焼器の急速混合燃焼技術を適用し、出力増加したガスタービンを導入し、震災後の発電容量増に貢献している。
4	中小容量機においては燃料多様化の開発を進めていく観点からは、水素リッチガス燃焼・噴霧燃焼についての取り組みを強化する必要があると考えるが、これまでの開発の経緯を見るとそのような体制はとられておらず、今後の課題である。	開発テーマの一つに多種燃料対応の高湿分燃焼器を加え、水素リッチガスの高湿分燃焼特性を評価する計画である。
5	革新的な新技術であるが故に、実証試験までには依然として多くの課題が残され、まだ時間が必要と思われる。特に、要素試験規模で実施が検討されている各要素の高性能化やスケールアップ、燃料多様化などの基礎試験期間が、1/3スケールの総合試験装置を用いた運転特性の評価と併せてわずか2年間で計画されていることは、実現上問題ではないかと考えている。	高信頼性化要素技術開発はH24年度～H27年度の4年間で計画しており、うち試験実施期間は1～2年程度である。総合試験装置を用いた試験も並行して4年間で計画している。この4年間の要素技術開発の成果を反映して詳細設計した実証機の運転により、長期信頼性を検証する。
6	中小型ガスタービンのAHATは、我が国独自の技術であり世界で初めての実証であることから、水分の蒸発の不均一さや再凝縮によって発生する非定常流体力の効果などの、高湿分のために発生が予想される非定常現象問題に特に留意して実証を進める必要がある。	大学の専門的知見を有効活用し、共同研究で非定常現象問題に取り組んでいる。

先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発の概要について

平成25年11月13日

株式会社IHI，ABB日本ベーレー株式会社，岡野バルブ製造株式会社，
新日鐵住金株式会社，東亜バルブエンジニアリング株式会社，
株式会社 東芝，バブコック日立株式会社，株式会社日立製作所，
富士電機株式会社，三菱重工業株式会社

目　次

１．プロジェクトの概要

２．目的・政策的位置付け

３．目標

４．成果、目標の達成度

５．事業化、波及効果

６．研究開発マネジメント・体制等

７．前回の中間評価結果

1．プロジェクトの概要

概　　要	従来型石炭火力発電の中で最高効率である超々臨界圧火力発電（USC）は、蒸気温度の最高温度は630℃程度（送電端熱効率42～43%）が限界と言われてきた。しかしながら、近年の材料技術の進歩により、700℃以上の蒸気温度を達成できる可能性が見えてきたことから、これらの材料を活用した先進超々臨界圧火力発電技術（A-USC）の開発を行う。 A-USCは、蒸気温度700℃級で46%、750℃級で48%の高い送電端熱効率の達成が可能な技術であり、2020年以降増大する経年石炭火力発電のリプレース及び熱効率向上（二酸化炭素排出量低減）需要に対応するため、早急に技術開発を進める必要がある。
実施期間	平成20年度～平成28年度　（9年間）
予算総額	135億円 （内2/3補助） 年度(平成) 20 21 22 23 24 25 26 27 28 予算(億円) 3 11 11 16 17 23 24 16 14
実 施 者	民間事業者 株式会社IHI，ABB日本ベーレー株式会社，岡野バルブ製造株式会社 新日鐵住金株式会社，東亜バルブエンジニアリング株式会社， 株式会社 東芝，バブコック日立株式会社，株式会社日立製作所， 富士電機株式会社，三菱重工業株式会社
プロジェクトリーダー	高効率発電システム研究所　福田雅文（代表理事）

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け

2-1 目的

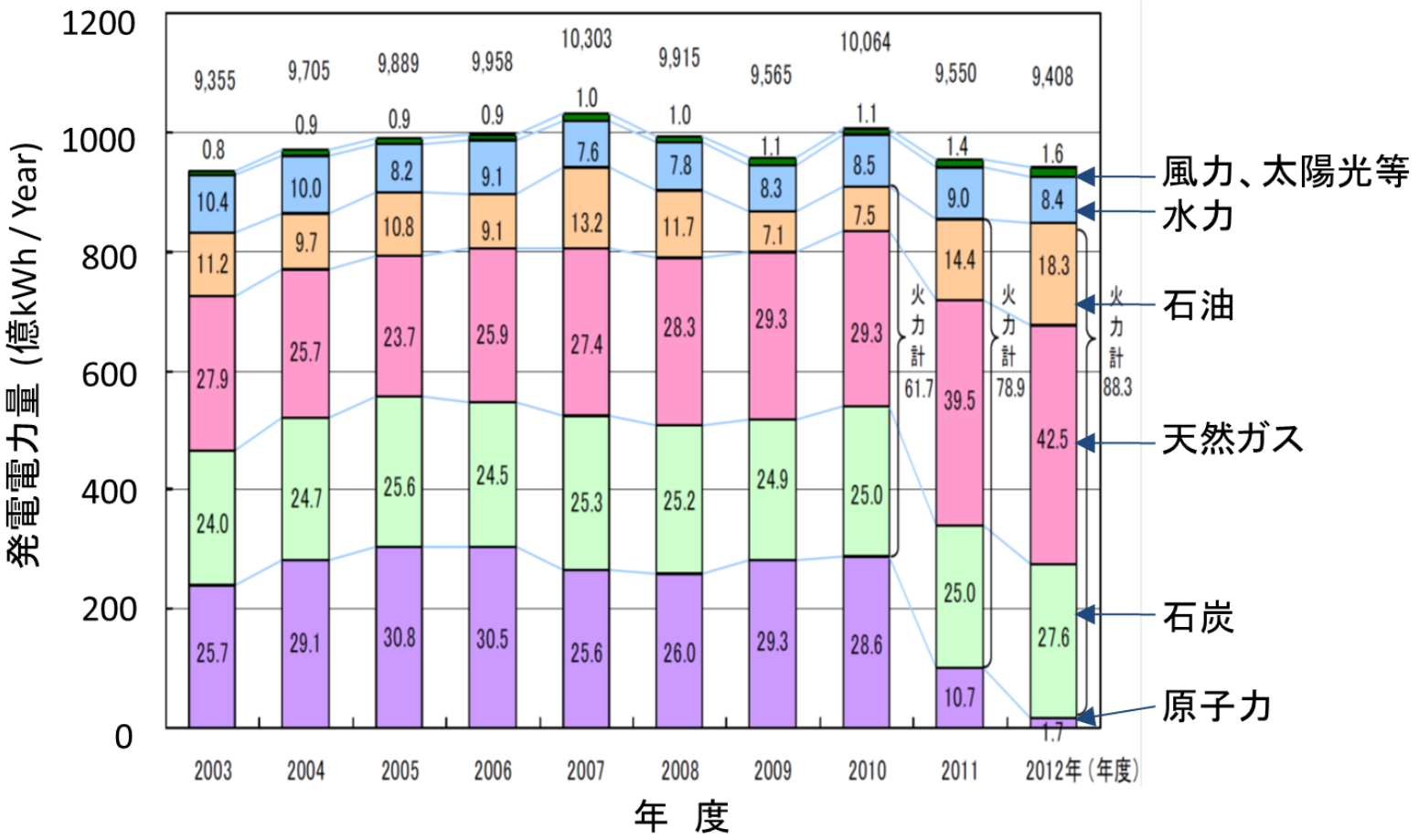
我が国のエネルギーセキュリティ確保のためには、長期的な視点に立った化石燃料資源の有効利用が重要課題の一つである。特に近年アジア地域で急速に経済発展が進み、その影響によりエネルギー源の多様化は必須の状況である。その埋蔵量や他の化石燃料（天然ガス等）への価格牽制等を勘案すれば、石炭はエネルギー源のベストミックスを追求する上で、重要な位置付けにあると考えられる。国内の電源構成では図1-1に示すように東日本大震災以後、原子力が減少し、石油、天然ガス、石炭のシェアが増大した。石油、天然ガスは比較的高価な燃料であり、現在の我が国の貿易収支を悪化させる要因となっている。石炭の価格は安価で安定している。しかしながら、石炭は二酸化炭素排出量が多いため、可能な限り効率良く、クリーンに利用できる技術の開発が強く求められている。

また、1970年代のオイルショック以降に大型石炭火力が建設されてきたが、初期のものは更新や大幅な改修の時期に迫りつつある。そのような需要に対して、有効な技術の開発が必要である。

本事業で研究開発する先進超々臨界圧火力発電（以下「A-USC」）はこのような必要性に応える石炭火力発電技術であり、現在最新の石炭火力よりも二酸化排出量の10~15%削減が期待できる。また、A-USCは従来石炭火力と同じシステム構成を有しているので、A-USCの技術を用いれば、既存石炭火力発電所を経済的に更新または大幅な改修を行うことが可能になる。

本事業では従来630℃程度が限界といわれていた蒸気温度を700℃まで向上し、2020年代に商用プラントでの高位発熱量基準送電端効率46%達成の見通しを得ることを目的として本技術開発を行うものである。

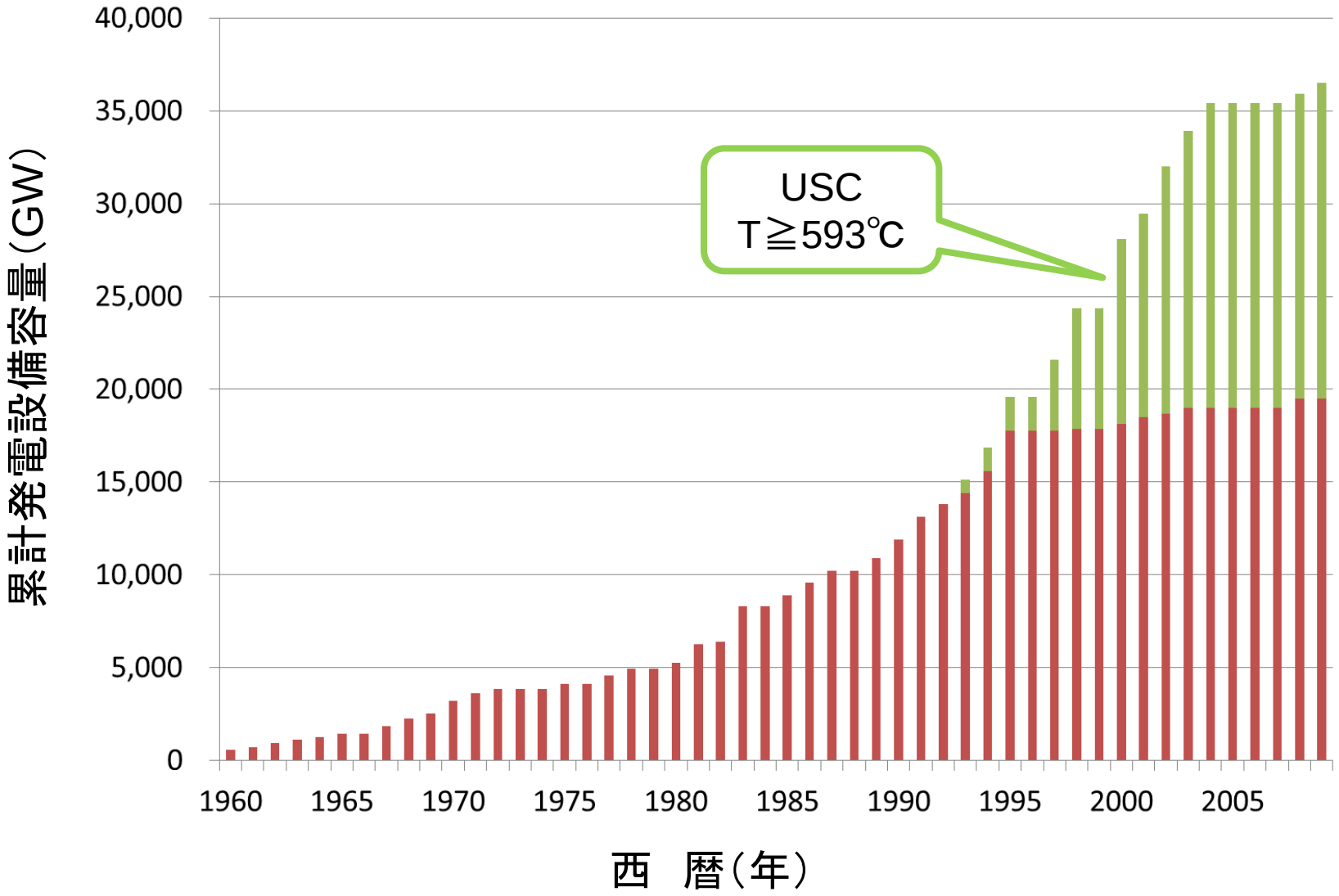
図1-1　一次エネルギー源毎の国内発電量



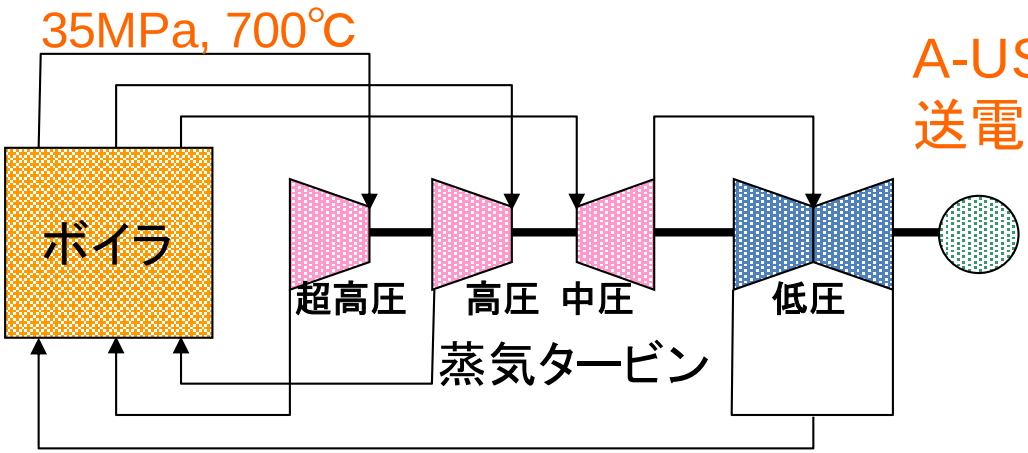
Source: http://www.fepc.or.jp/about_us/pr/sonota/__icsFiles/afieldfile/2013/05/17/kouseihi_2012.pdf

①石炭は化石燃料の中でCO_2 排出は大きいものの、コスト・供給安定性の面で優れたエネルギー源である。（エネルギー基本計画　平成22 年6 月）
②東日本大震災の影響により、現在、国内発電電力量の90%程度が化石燃料で賄われている。
③天然ガス、石油が増加しているが、その燃料コストは我が国の貿易収支に影響を与えている。

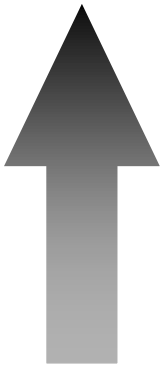
国内石炭火力発電所設備容量

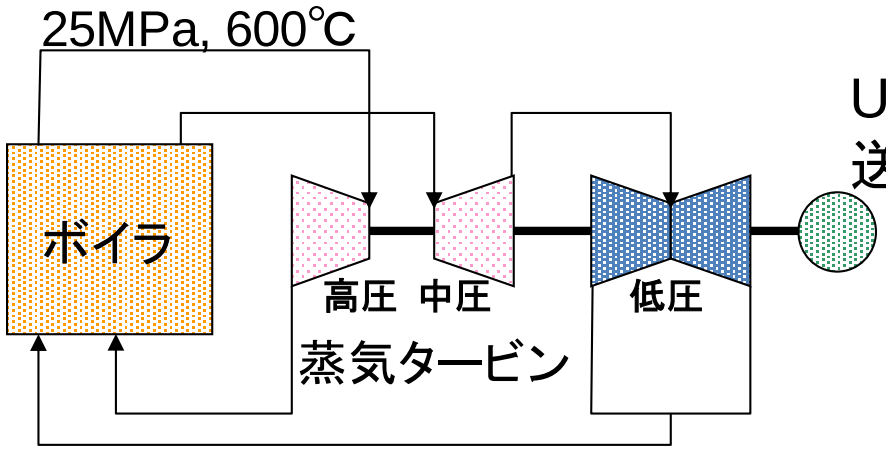


A-USCの目的



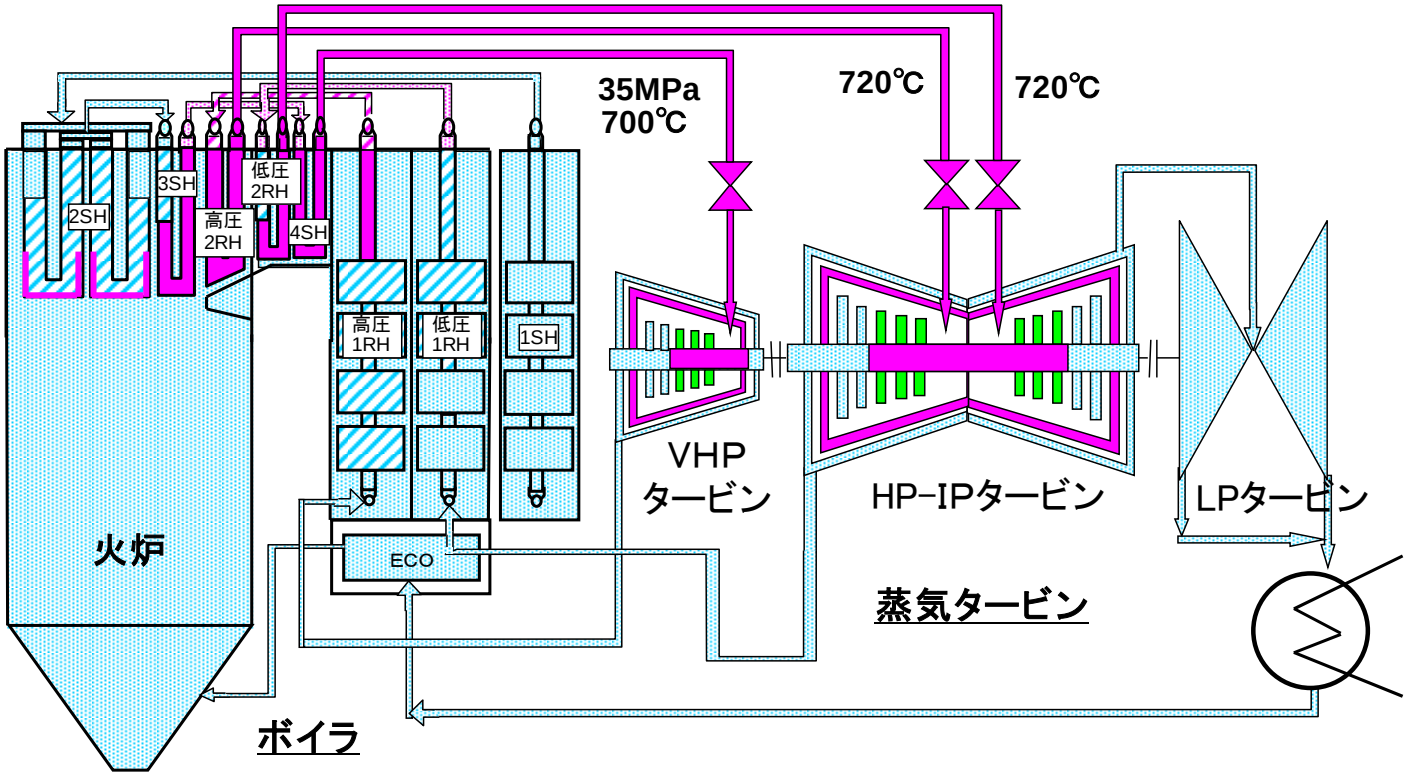
A-USC
送電端熱効率　46～48%（HHV）





USC（最新石炭火力技術）
送電端熱効率　42%（HHV）

A-USCシステムと候補材料



従来材料	未実績材料	開発材料
フェライト系	フェライト系	フェライト系
オーステナイト系	オーステナイト系	オーステナイト系
	Ni基	Ni基/ Fe-Ni基

650℃超　→　ニッケル基材料

650℃以下　→　先進9Crフェライト系鉄鋼材料

2-2 政策的位置付け (1/2)

「京都議定書目標達成計画」（平成17年4月閣議決定）において、エネルギー転換部門の取り組みにおいて、「電力分野の二酸化炭素排出原単位の低減」として、発電部門における二酸化炭素排出量原単位を低減させることが重要であることから、火力発電の熱効率の更なる向上の対策を講ずるとされている。

「第3期科学技術基本計画」（平成18年3月閣議決定）の分野別推進戦略において、化石燃料の開発・利用の促進における重要な研究開発課題、「クリーン石炭利用技術」に位置づけられている。また、「平成22年度の科学技術に関する予算等の資源配分の方針」（平成21年6月）において、低炭素社会実現に必要な「最重要政策課題」に位置づけられている。

「新・国家エネルギー戦略」（平成18年5月）において、総合資源戦略確保の具体的取組として、「化石エネルギーのクリーンな利用の開拓」が位置づけられている。

「低炭素社会づくり行動計画」（平成20年7月閣議決定）において、ロードマップの着実な実行が掲げられている「Cool Earth-エネルギー革新技術計画」及び「環境エネルギー技術革新計画」の双方に位置づけられている、高効率石炭火力発電の技術開発。（図1-2）

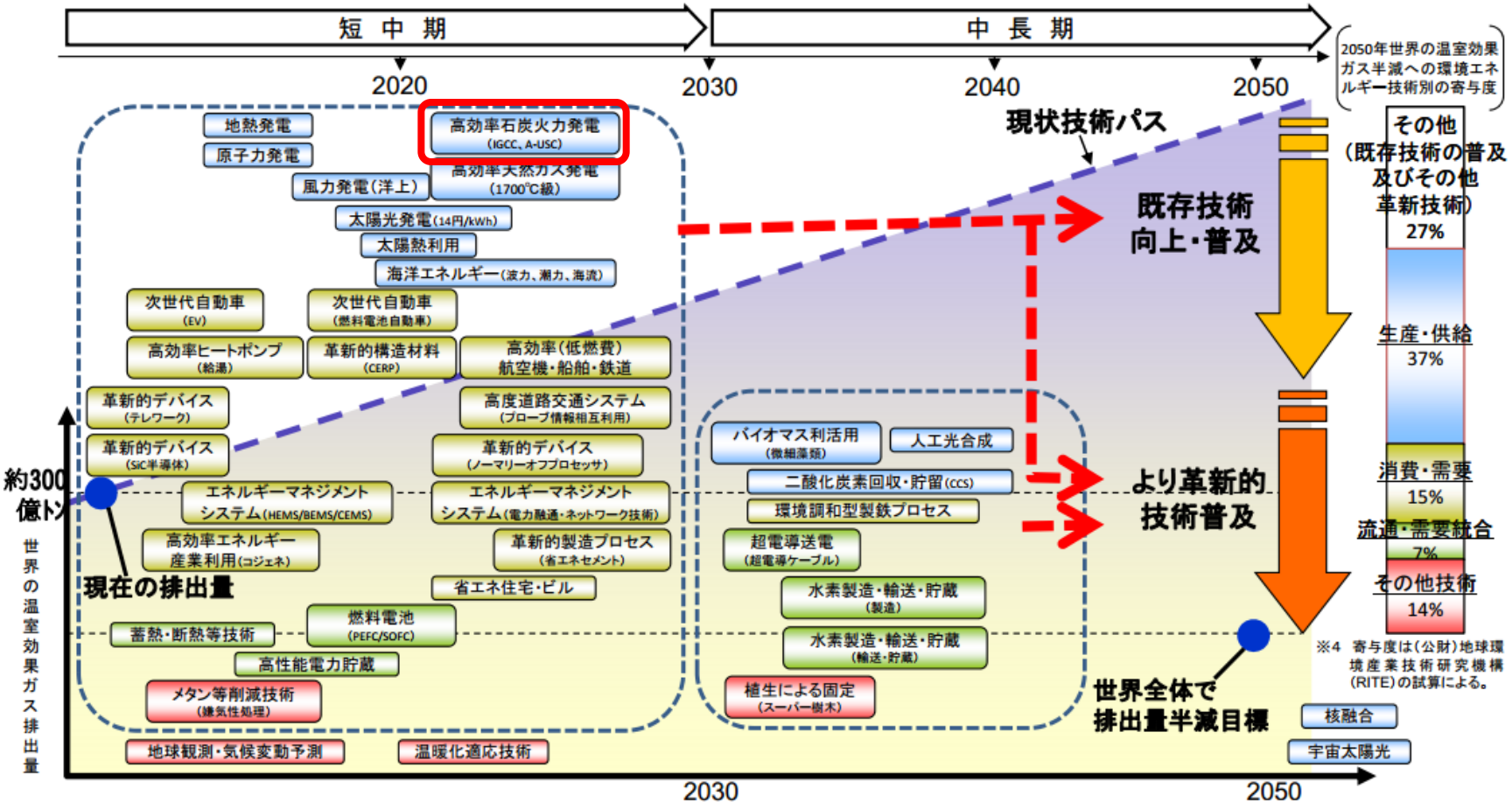
「エネルギー基本計画」（平成22年6月改定）において、我が国が有する世界最高水準の石炭火力発電技術をさらに革新していくことが重要であり、IGCC・A-USC（先進的超々臨界圧発電）等について、更なる高効率化や早期の実用化を目指して、官民協力して開発・実証を推進するとされている。さらに、高効率の石炭火力技術については、我が国を環境に優しい石炭火力の最新鋭技術の実証の場として位置づけ国内での運転実績の蓄積を図るとしている。

「日本再興戦略」（平成25年6月）において「二．戦略市場創造プラン」「テーマ2：クリーン・経済的なエネルギー需給の実現」「〇火力発電の技術開発支援」の中で、「先進超々臨界圧火力発電（A-USC）について2020 年代の実用化を目指す（発電効率：現状39%程度→改善後46%程度）。」と位置付けられている。

2-2 政策的位置付け (2/2)

総合科学技術会議「環境エネルギー技術革新計画」（平成25年9月）において、生産・供給分野の主要技術として高効率石炭火力発電のさらなる高度化が掲げられている。

我が国は、優れた環境エネルギー技術を、短中期、中長期と切れ目なく開発を進め、世界に普及することにより、2050年までに世界全体で温室効果ガスを半減する目標達成に貢献する。既存技術の向上・普及だけでは限界があることから、中長期的により革新的な技術開発を推進する必要がある。



※4 寄与度は（公財）地球環境産業技術研究機構（RITE）の試算による。

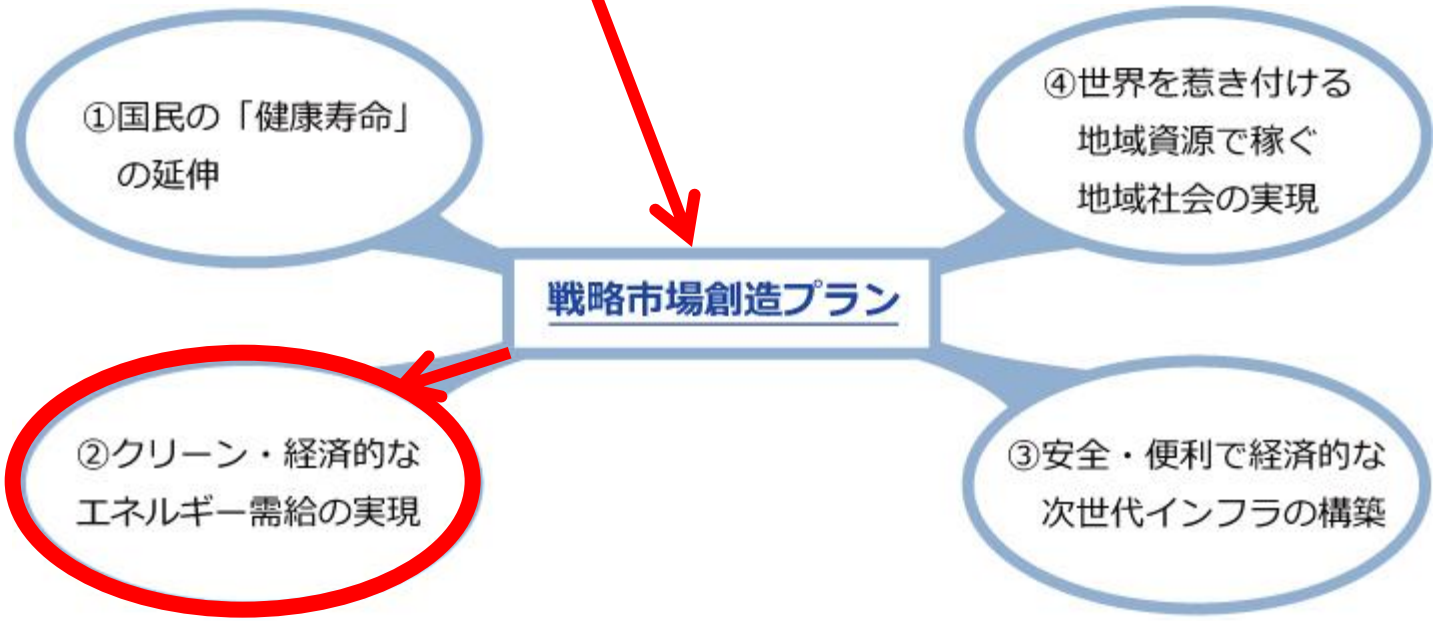
出典：総合科学技術会議 環境エネルギー技術革新計画（改訂案）【概要】 平成25年9月13日

Cool Earth-エネルギー革新技術計画

A-USCは高効率石炭火力発電の一つとして位置付けられている。

出典:「Cool Earth －エネルギー革新技術計画」(概要) 平成20年3月5日 経済産業省

日本再興戦略



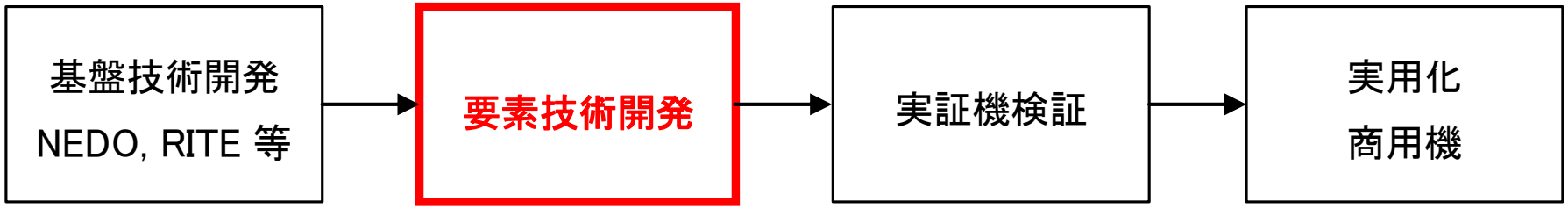
出典：首相官邸ウェブサイト http://www.kantei.go.jp/jp/headline/seicho_senryaku2013.html

3. 目標

3-1 事業完了時点での全体目標

本研究開発は要素技術開発として位置づけられ、実証機検証に向けた要素技術の確立を目指す。

すなわち、蒸気温度を700℃へ高めるための要素技術開発を実施し、2020年以降において商用プラントでの高位発熱量基準送電端熱効率46%達成の技術的見通しを得ることを本研究開発完了時点での全体目標とする。



要素技術開発項目

(1) システム設計、設計技術開発
(2) ボイラ要素技術開発
(3) タービン要素技術開発
(4) 高温弁要素技術開発
(5) 実缶試験・回転試験（高温弁を含む）

3-1-3　論文状況等

表3-1-2　特許･論文等件数

項目	件数
論文数	10
学会誌等投稿数	7
発表数	59
特許件数	1

開発項目とマススケジュール

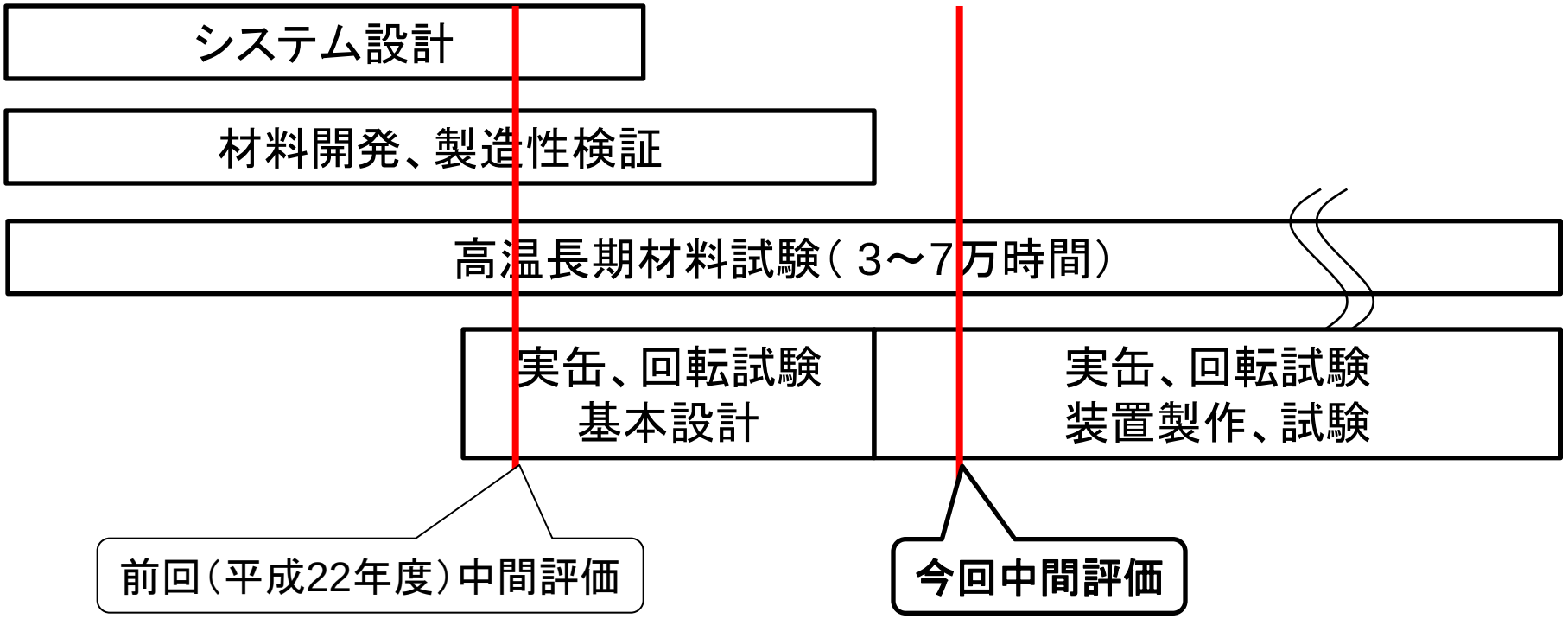
3-2　中間評価時点での全体目標

①システム設計を完了する。

②ボイラ、タービン高温弁の材料開発、製造性検証を完了する。

③中間評価時点では一部の材料では3万時間を超える高温長期材料試験結果が得られているので、これらの結果を10万時間まで外挿し長期信頼性を推定する。

④実缶試験、回転試験設備の基本設計を完了する。

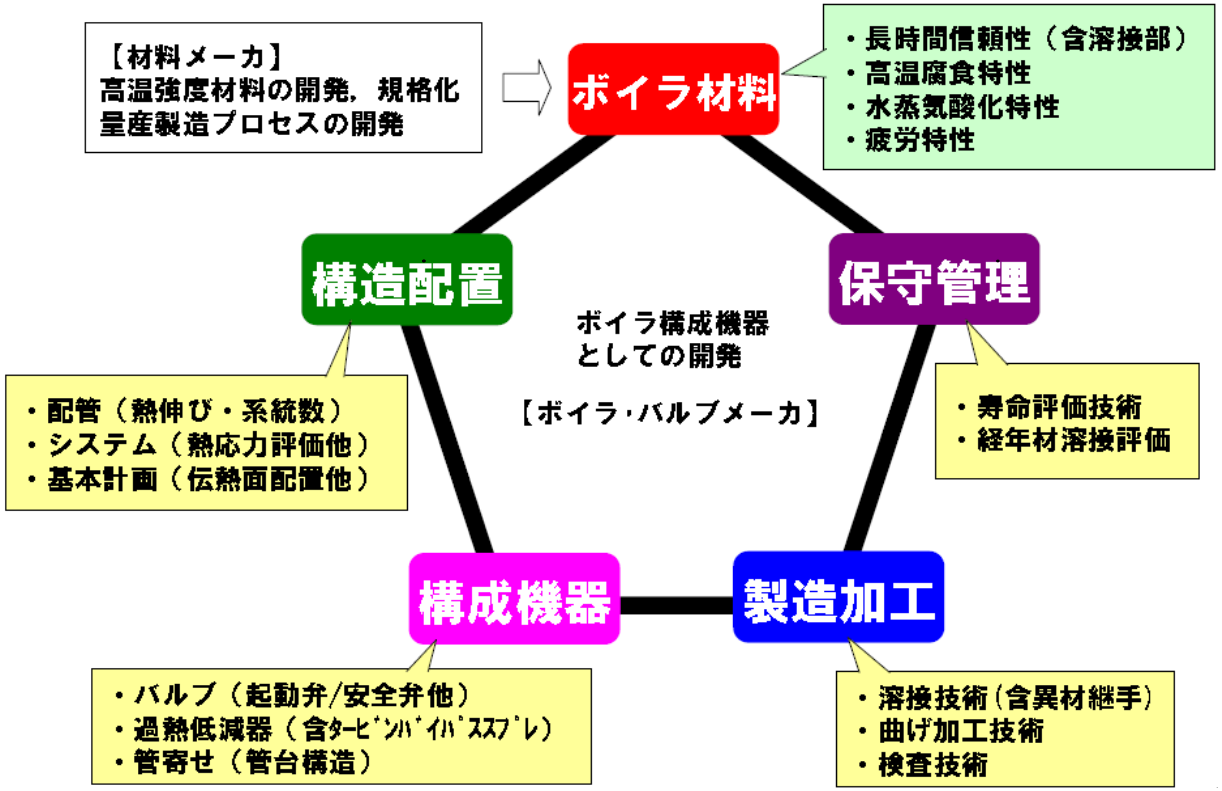


3-3 中間評価時点での個別要素技術目標

3-3-1 システム設計、設計技術開発

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
システム設計 設計技術	基本設計、配置最適化 経済性検討完了	商用プラントの成立性の確認

3-3-2 ボイラ要素技術開発



ボイラの開発課題

■700℃級材料の長期信頼性の検証が重要である。

■中間評価時点では大径管、伝熱管を試作し、過熱器、再熱器のモックアップを完成するとともに、3万時間程度の材料試験を行い、その結果を外挿し10万時間の長期信頼性を見積もっている。

3-3-2 ボイラ要素技術開発

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
ボイラ要素技術	選定された候補材料で3万時間程度の試験からの外挿により以下目標の達成可能性を検討する。	10万時間の材料強度を推定するには3万時間程度の長時間材料試験等による検証が欠かせない。

部材	クリープ破断時間	温度	応力
Ni基系 過熱器管材料	10万時間	750℃	90MPa
Ni基系 再熱器管材料	10万時間	750℃	60MPa
Ni基系 厚肉大径管材料	10万時間	700℃	90MPa
フェライト系 厚肉大径管材料	10万時間	650℃	80MPa

3-3-3 タービン要素技術開発

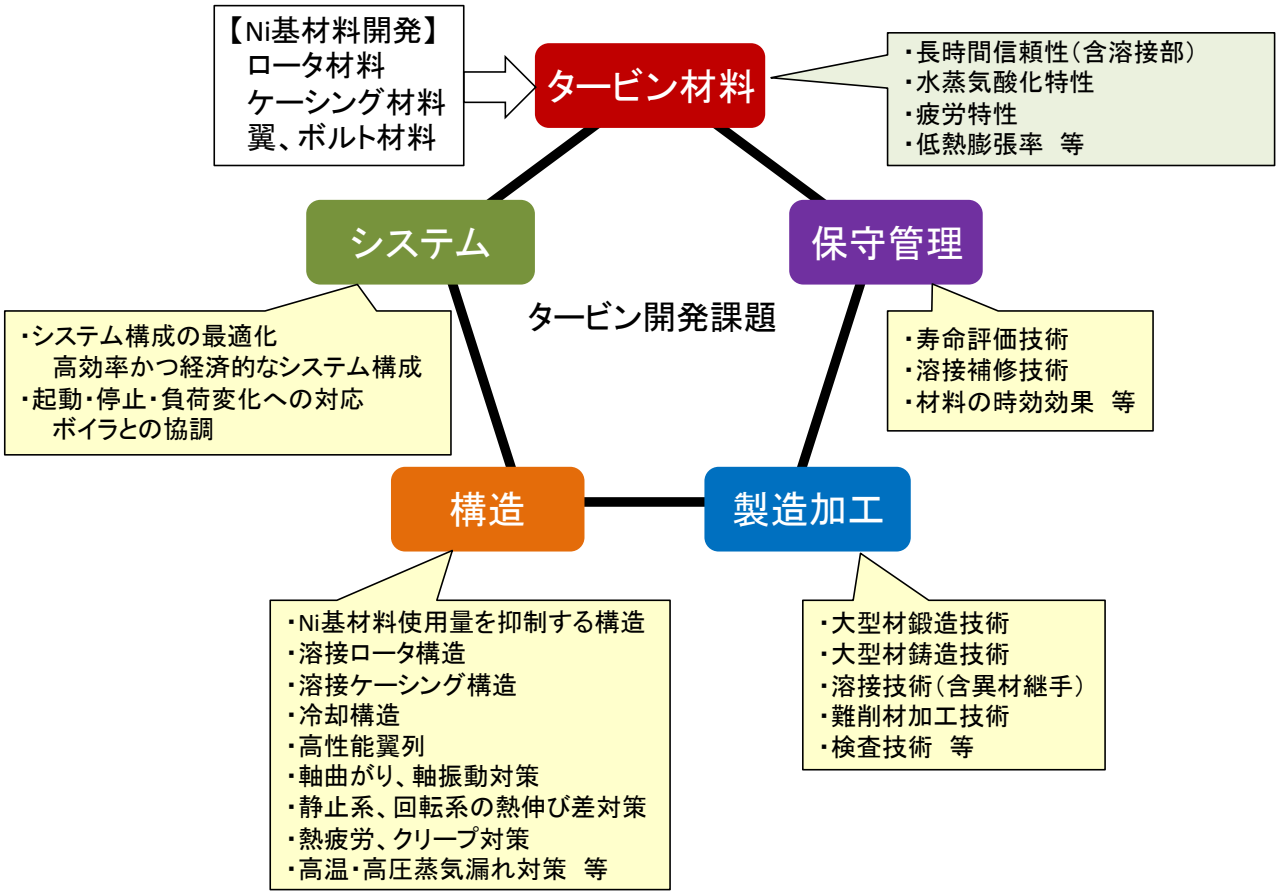


図2-6　タービンの開発課題

■大型鋼塊の製造性、クリープ強度（長期信頼性）の検証が重要である。
■中間評価時点では大型鋼塊を試作するとともに、3万時間程度の材料試験結果から10万時間の長期信頼性を見積もっている。

3-3-3 タービン要素技術開発

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
タービン要素技術	選定された候補材料で3万時間程度の試験からの外挿により以下目標の達成可能性を検討する。	10万時間の材料強度を推定するには3万時間程度の長時間材料試験等による検証が欠かせない。

部材	クリープ破断時間	温度	応力
Ni基系 鍛造大型ロータ材料	10万時間	700℃	100MPa
Ni基系 鋳造大型ケーシング材料	10万時間	700℃	80MPa

3-3-4 高温弁要素技術開発

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
高温弁要素技術	摺動（擦れ合い）試験、水蒸気酸化試験、熱衝撃試験等の要素試験により材料選定作業を行い、最適な弁材料を見出す。	弁は弁棒と弁棒を保持する筒（ブッシュ）が700℃環境下で擦れあうので、弁動作を保証するためには摺動試験による検証が欠かせない。 同様に各種弁部品の700℃での水蒸気酸化特性や熱衝撃特性を確認する必要がある。

候補材料：
Alloy617
Alloy 625
Alloy X-750,
Alloy 783,
Stellite #6,
Stellite #12
トリバロイT800
LTES700

候補表面処理：
窒化
Cr3C溶射

3-3-5　実缶試験・回転試験

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
実缶試験・ 回転試験	試験設備の基本設計を完了する。	平成27、28年度に実施する実缶試験・回転試験に向け、平成25、26年度には設備の製作設計、製作、据付を行う。それに先立ち設備の基本設計を完了する必要がある。

4. 成果、目標の達成度

・システム設計を完了し高位発熱量基準送電端熱効率46%を達成可能であること、発電コストが従来のUSC並み以下であることを確認した。
・ボイラ、タービン高温弁の材料開発、製造性検証を完了した。
・3万時間程度の材料試験により期待した材料特性が得られる見通しを得た。
・実缶試験・回転試験設備の基本設計を完了した。

4-1 システム設計、設計技術開発

・500MW、700MW、1000MWのシステム設計を実施し、高位発熱量基準送電端熱効率46%が得られることを確認した。
・500MWシステムの経済性を検討し、二酸化炭素を10%低減しているにもかかわらず、従来のUSC並み以下の発電コストであることを確認した。

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
システム設計 設計技術	システム設計により熱効率46%以上、発電コストが従来USCと同等	熱効率46%を確認した。 従来のUSC並み以下の発電コストであることを確認した。	達成

4-1　システム設計、設計技術開発

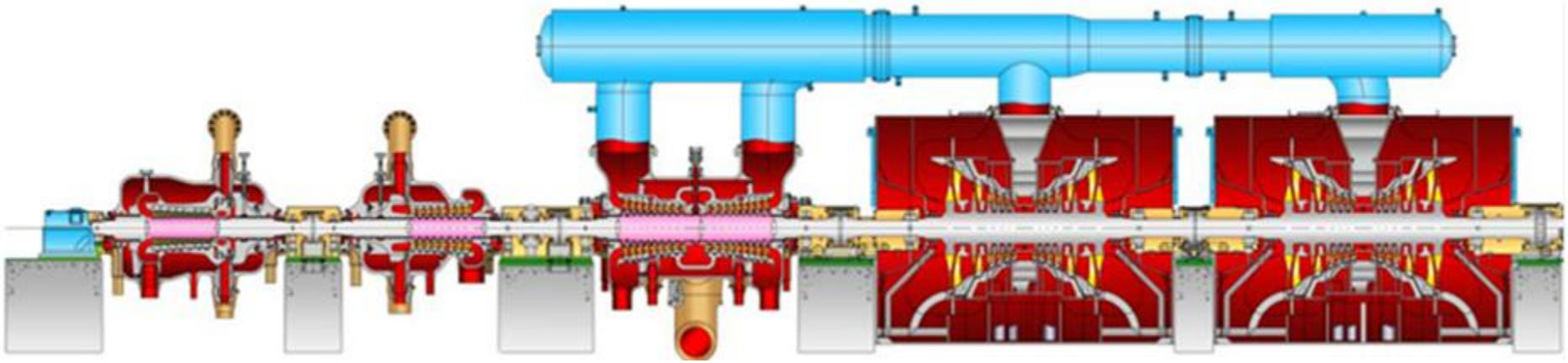


図3-1　1000MWのタービン断面図

4-2 ボイラ要素技術開発

- 6種類のNi基合金と3種類の9Cr鋼で大径管、小径管を試作し、3万時間程度の材料試験を実施した。
- 3万時間程度の試験結果を10万時間まで外挿することにより、材料強度の目標を達成できる見通しを得た。今後、実際に10万時間まで試験を継続し、確認をする。

図3-5 ボイラ大径管と小径管

4-2 ボイラ要素技術開発

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
ボイラ要素技術	6種類のNi基合金と3種類の9Cr鋼で大径管、小径管を試作し、3万時間程度の材料試験を実施した。	3万時間程度の試験結果を10万時間まで外挿することにより、材料強度の目標を達成できる見通しを得た。 今後、実際に10万時間まで試験を継続し、確認をする。	達成

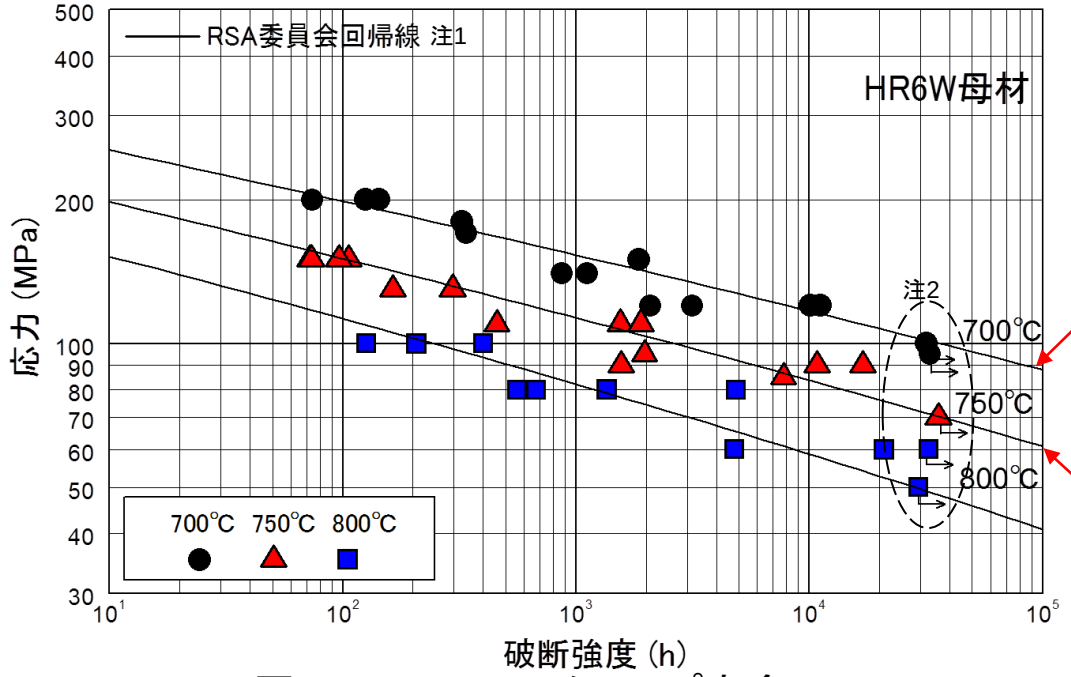


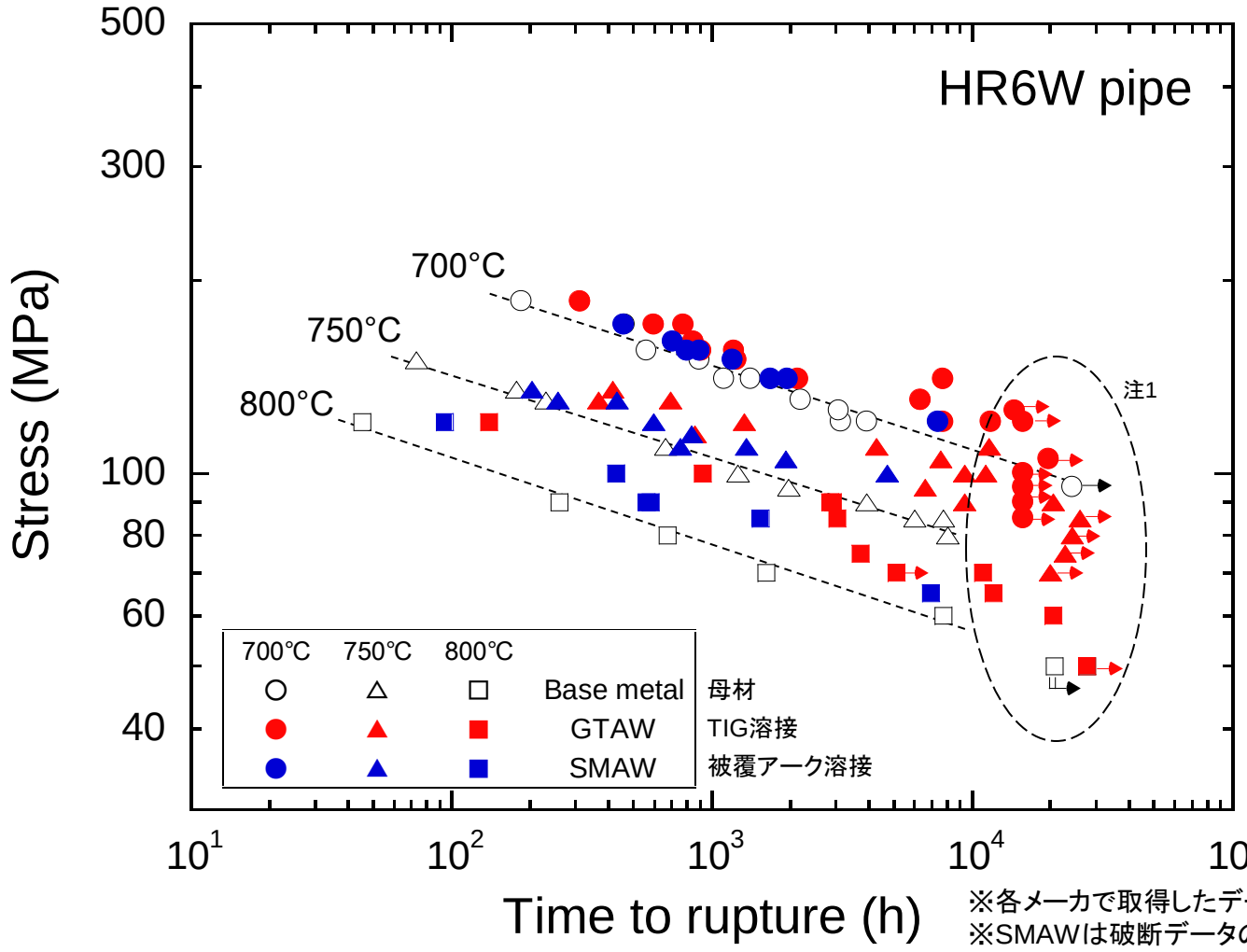
図3-17　HR6Wのクリープ寿命

■HR6Wの現在得られている試験データを外挿すると700℃、10万時間のクリープラプチャ強度はNi基大径管としての目標値である90MPa程度となる。

750℃では10万時間で再熱器管材料としての目標値である60MPa程度となる。

注1：RSA委員会とは火力関係設備効率化技術調査委員会（発電設備技術検査協会主催）の略称であり、新材料の特性や、新技術に関する必要かつ十分な調査を実施した。
回帰線は当該委員会で得られた材料クリープ破断データから得られた回帰曲線である。
注2：矢印は長時間クリープ破断試験を遂行中（まだ破断していない）ことを意味する。

4-2 ボイラ要素技術開発



注1：矢印は長時間クリープ破断試験を逐行中（まだ破断していない）ことを意味する。

※各メーカで取得したデータをまとめて整理した
※SMAWは破断データのみプロットした

図3-18 HR6Wとその溶接継手のクリープ寿命

■溶接継手の寿命は母材を上回っており、期待通りの性能を示している。

4-2 ボイラ要素技術開発

本ページは前回中間評価時の成果である。
開発の全体像を捉えていただくために再度紹介する。

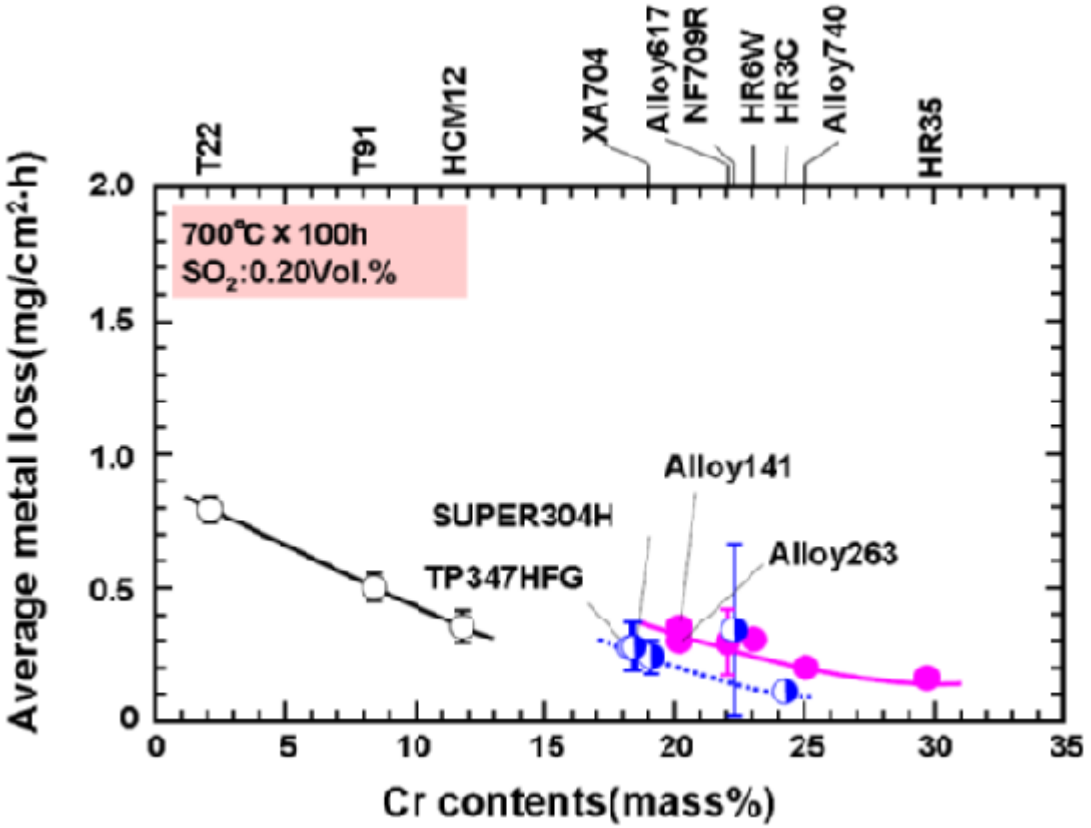
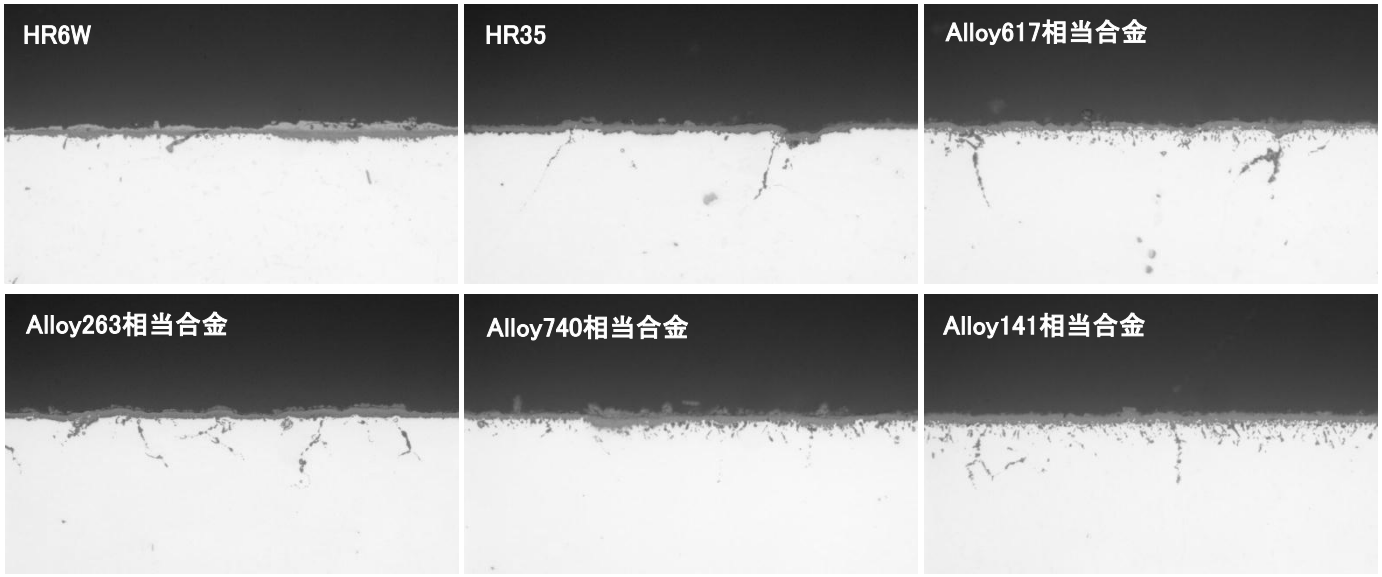


図3-23 ボイラ材料の高温腐食

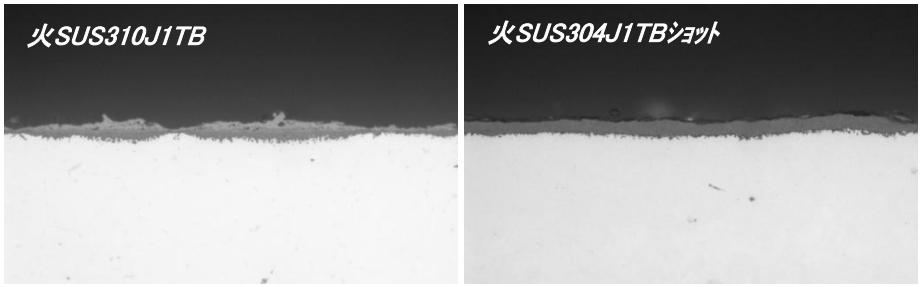
■ピンクで示された候補Ni基系材料はどれもクロム含有量が20%以上と多いので、耐腐食性が良好であることが確認された。

4-2 ボイラ要素技術開発

【候補材】



【比較鋼】



ボイラ候補材料の水蒸気酸化試験（750℃×10,000時間）

■750℃×10,000時間の水蒸気酸化試験の結果では、候補Ni基系材料のスケール厚さ（各写真の中央部にある灰色の層）は全て5μm程度で，現用オーステナイト鋼に比べ，スケール厚さは薄く，良好な耐水蒸気酸化性を示している。

4-2 ボイラ要素技術開発

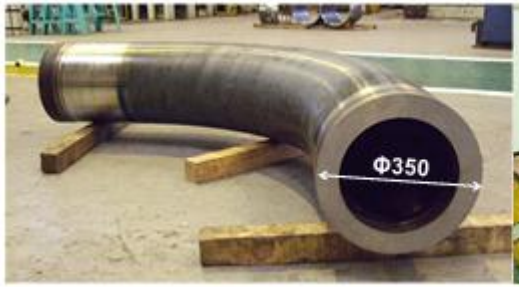
本ページは前回中間評価時の成果である。
開発の全体像を捉えていただくために再度紹介する。

■大径管の試作
材料加工特性試験を実施した結果、大径管の製造に適した材料としてHR6W、HR35、Alloy617を選んだ。

大径管溶接試験

■一部に高い溶接割れ感受性を示す材料もあったが、概ね良好な溶接施工を行うことができた。

大径管高周波加熱曲げ試験



■Alloy617、HR6W、HR35について実施した。
加熱温度を調整し、すべて曲げ加工可能だった。

4-2 ボイラ要素技術開発

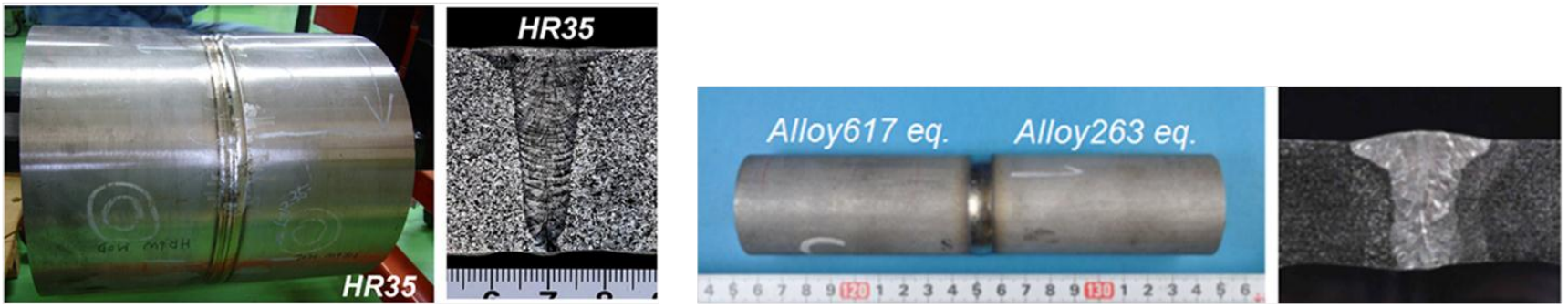


図3-7 大径管と小径管(異材溶接)の溶接継手

■Ni基大径管と小径管(異材溶接)の溶接継手の例を示す。一部に高い溶接感受性を示す材料があったが、概ね良好な溶接施工を行うことができた。

4-2 ボイラ要素技術開発

図3-8 再熱器、過熱器ヘッダーモックアップ

■モックアップの試作

これまで開発してきた大径管、小径管、溶接技術、管曲げ技術を駆使して再熱器、過熱器のモックアップ（写真）と再熱器、過熱器の伝熱管パネルモックアップを試作した。

4-3 タービン要素技術開発

- 3種類のNi基中型ロータ材料（FENIX700、LTES700R、TOS1X）と3種類のNi基中型ケーシング材料（Alloy617、Alloy625、Alloy740）を試作し、その成果をもとに、大型ロータ、大型内部ケーシング、高温弁ケーシング、ノズルボックスを試作した。
- 3万時間程度の長時間時間材料試験を実施した。この結果を10万時間まで外挿することにより、材料強度の目標を達成できる見通しを得た。
- 今後、実際に10万時間まで試験を継続し、確認をする。

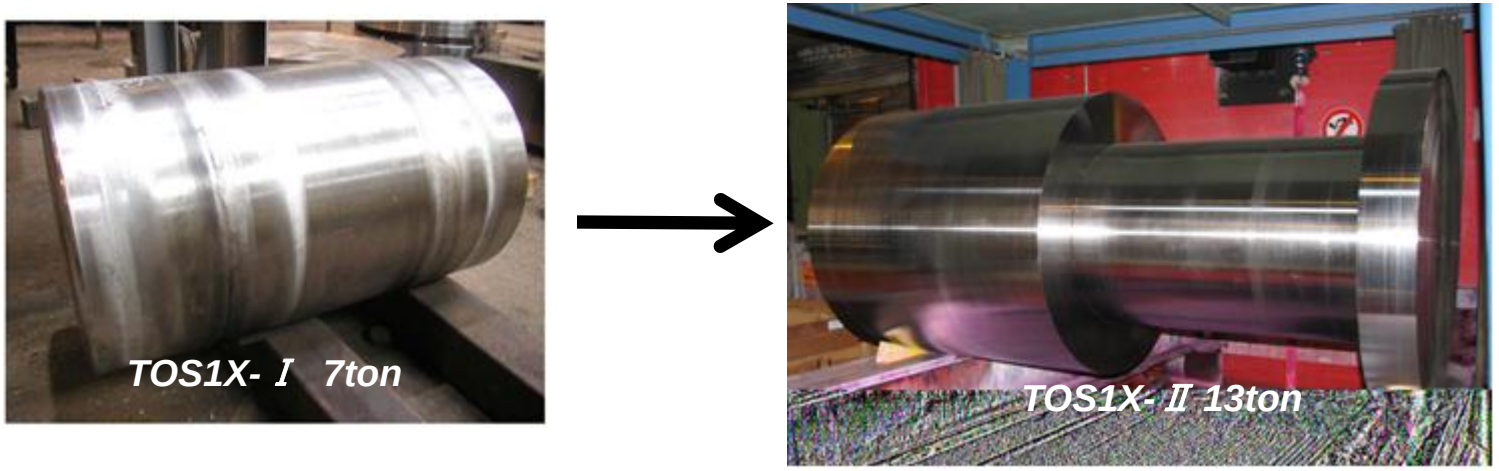


図3-9 タービンロータ材料（TOS1X）

4-3 タービン要素技術開発

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
タービン要素技術	ロータ、ケーシング候補材料について、3万時間程度の材料試験を実施した。	3万時間程度の試験結果を10万時間まで外挿することにより、材料強度の目標を達成できる見通しを得た。 今後、実際に10万時間まで試験を継続し、確認をする。	達成

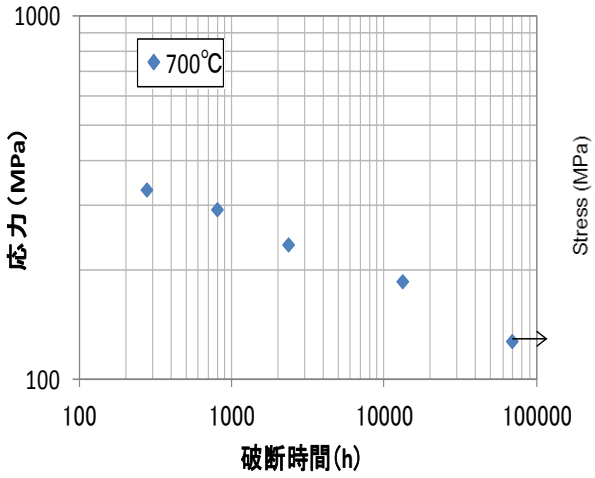


図3-25　FENIX700

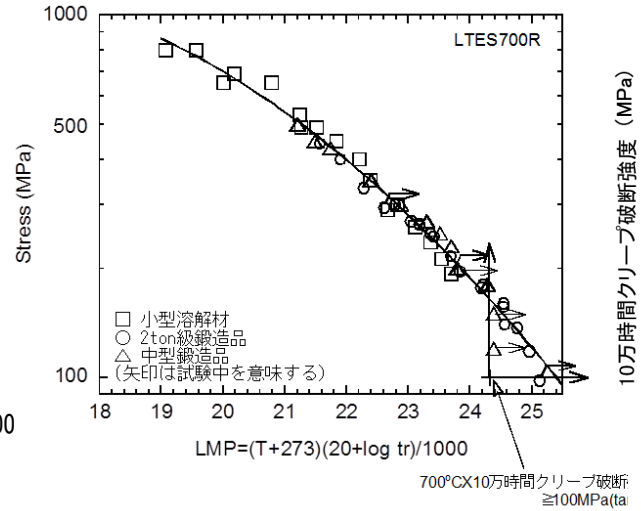


図3-26　LTES700R

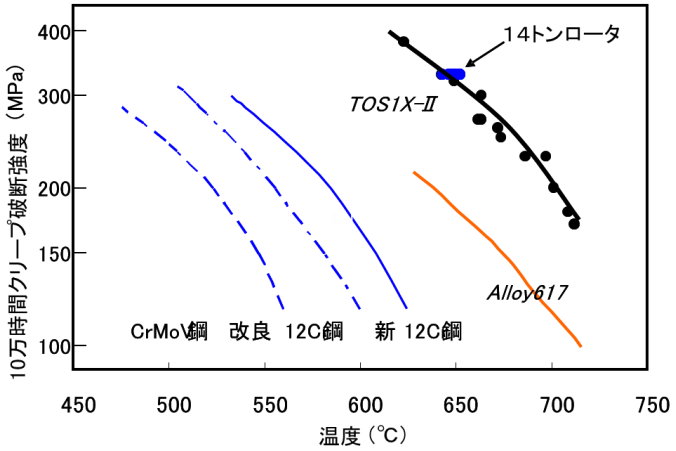


図3-27　TOS1X

タービンロータ材料のクリープ破断強度

4-3 タービン要素技術開発

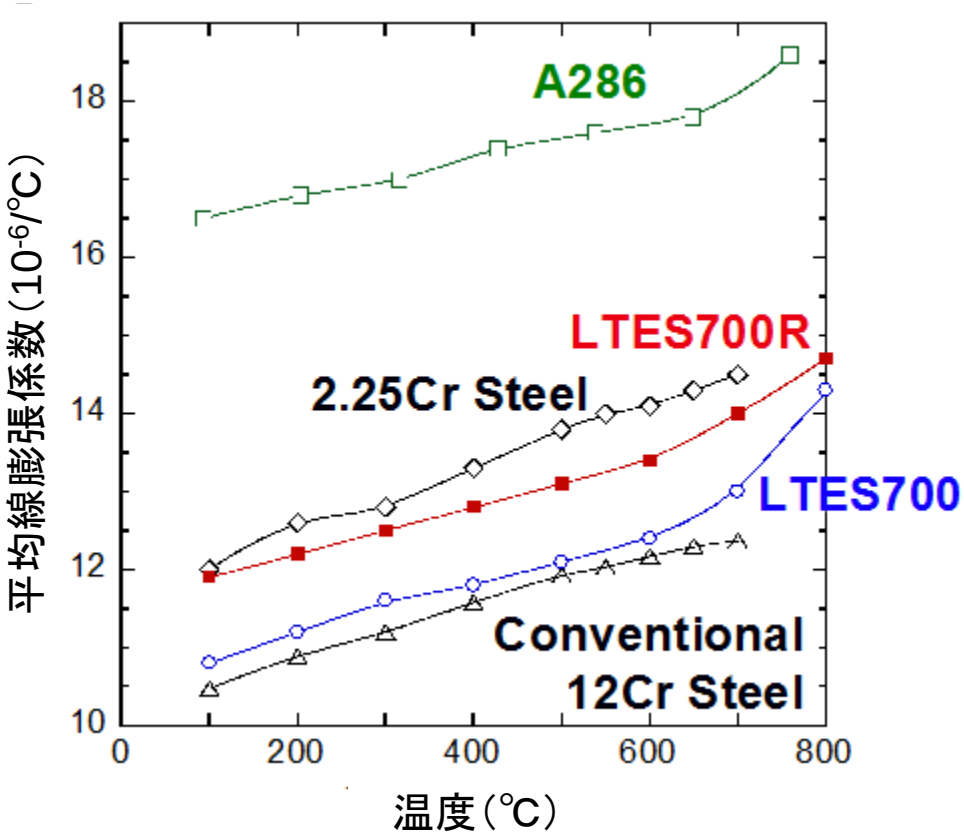


図3-10 タービンロータ用低熱膨張合金LTES700R

■LTES700Rは一般のNi基合金よりも低い線膨張係数になるように設計された材料であり、鉄鋼材料（2.25Cr Steel, Conventional 12Cr Steel）と同じレベルの値を有している。
そのため、鉄鋼材料と組み合わせたときに発生する熱応力を抑えることができる。

4-3 タービン要素技術開発

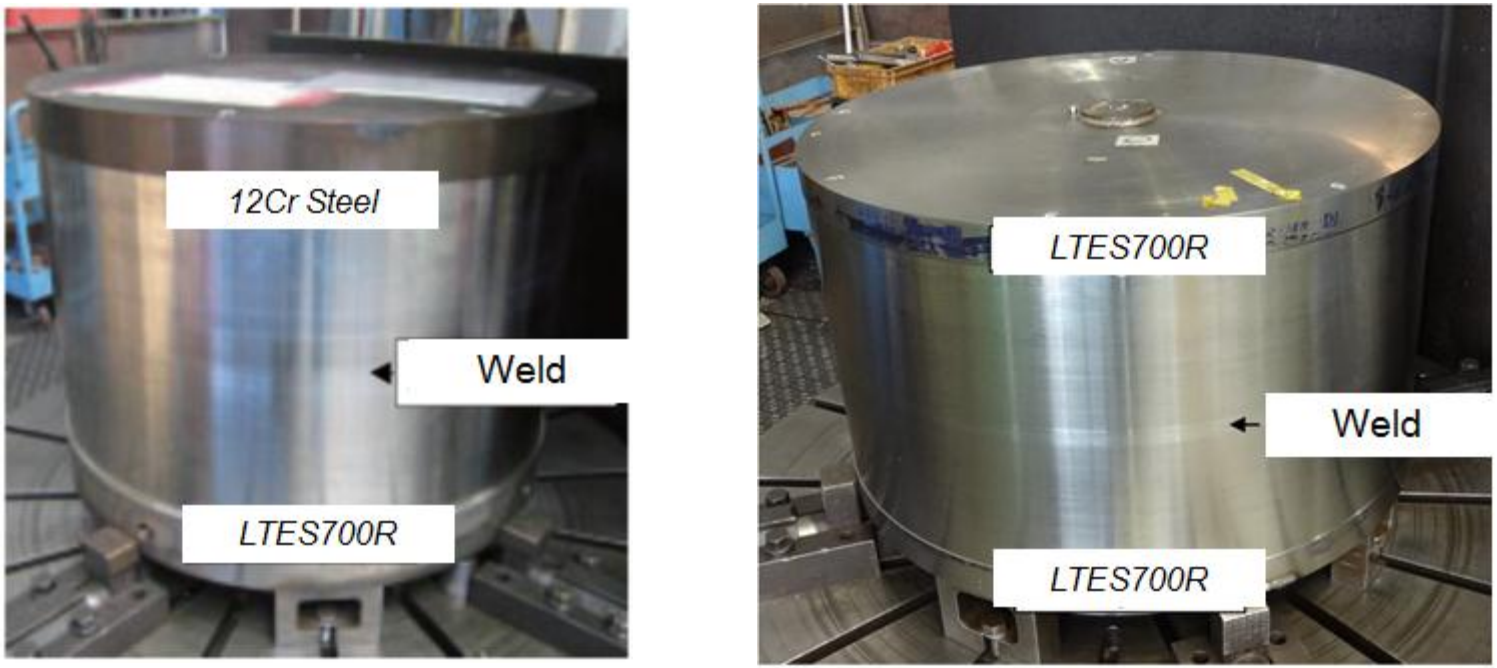


図3-11 タービンロータの溶接（異材、共材）

■タービンロータは一体のNi基合金で製作することは難しい。そのため、Ni基合金の共材溶接、Ni基合金と鉄鋼材料の異材溶接技術を開発した。

4-3 タービン要素技術開発

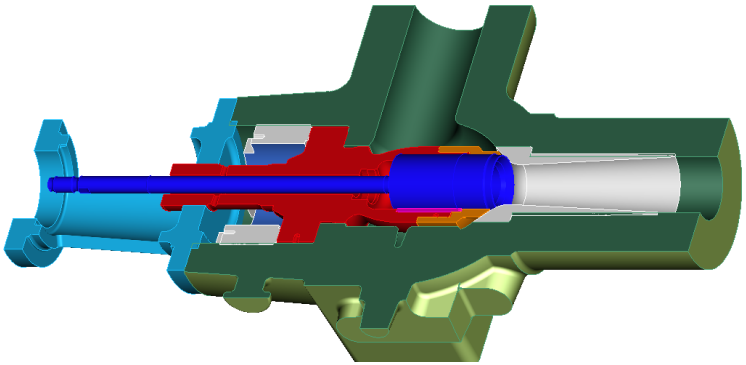
図3-12 タービン用Ni基鋳物試作

■ケーシング材料については、新たな開発は行わず、既存材料の中で蒸気タービンのケーシング材に最も適した材料の選定を行うこととした。
■候補としてはAlloy617、Alloy625、Alloy740があり、まず中型のステップブロックを製作し、材料特性を確認した後、内部ケーシング、弁ケーシング、ノズルボックス等の大型鋳物を試作した。

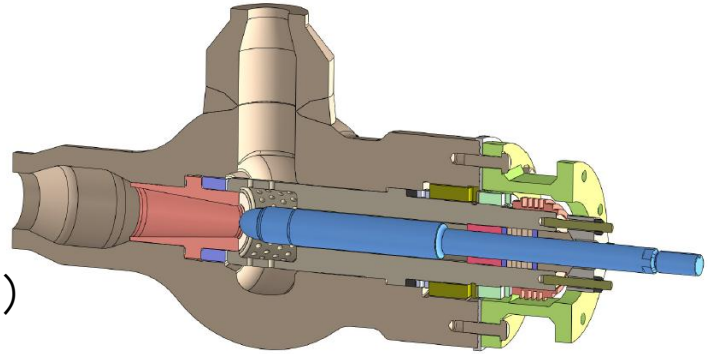
4-4　高温弁要素技術開発

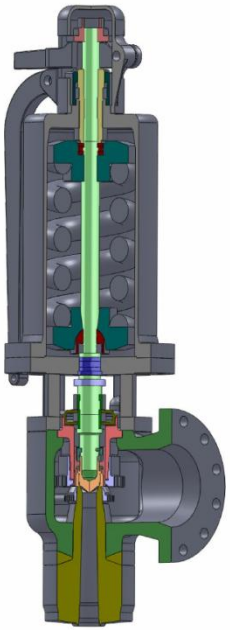
- 高温弁についてはNi基合金、Co基合金、耐摩耗コーティング材等の組合せで700℃の環境下で摺動摩耗試験を実施した。
- その結果、従来材料を600℃の環境下で摺動させた場合よりも摩耗量が少ない組合せを見出した。
- 実機高温弁の設計を実施し、鋳造による大型弁ケーシングの製造を確認した。

タービン制御弁

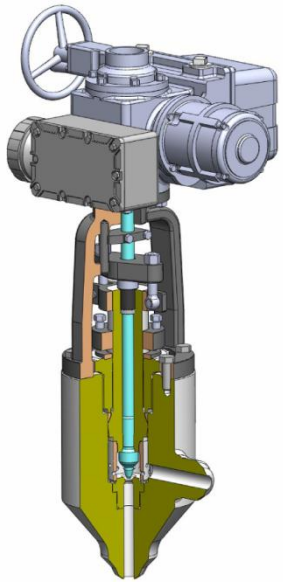


ボイラ起動弁（タービンバイパス弁）





ボイラ安全弁

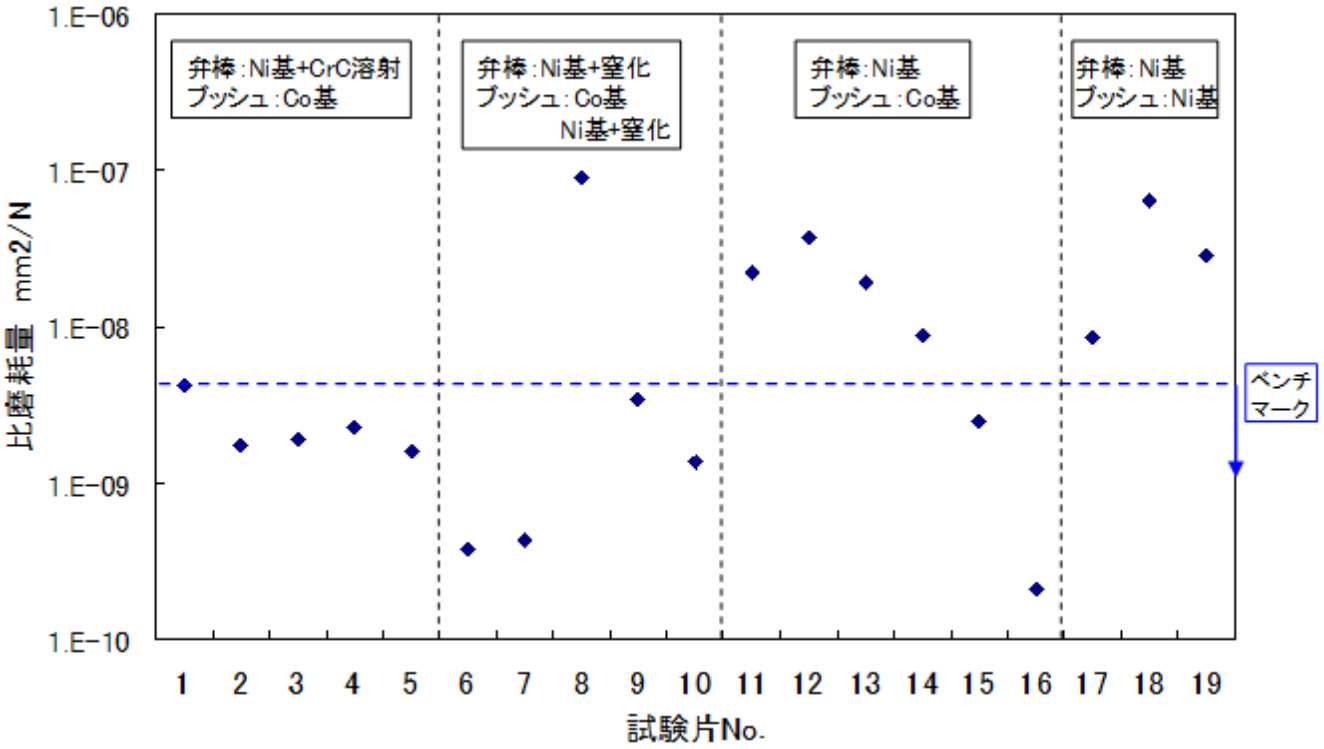


一般玉型弁

図3-13　高温弁

4-4 高温弁要素技術開発

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
高温弁要素技術	要素試験により材料選定作業を行う。	弁材料の摺動試験、水蒸気酸化試験等を実施し、700℃条件下で使用できる材料の組合せがあることを見出した。実機高温弁の設計を実施し、鋳造による大型弁ケーシングの製造性を確認した。	達成



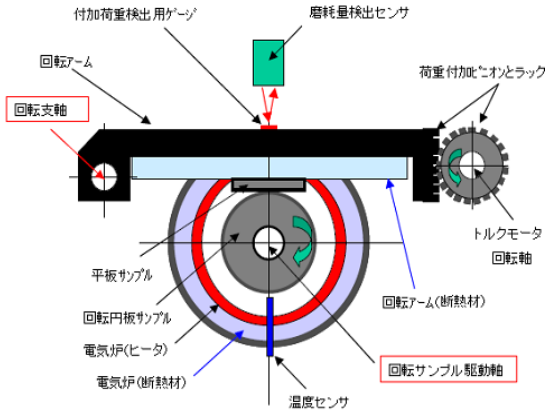


図3-30　高温弁材料の高温摩擦磨耗試験

■従来材料を600℃の環境下で摺動させた場合よりも摩耗量が少ない組合せを見出した。

4-4 高温弁要素技術開発

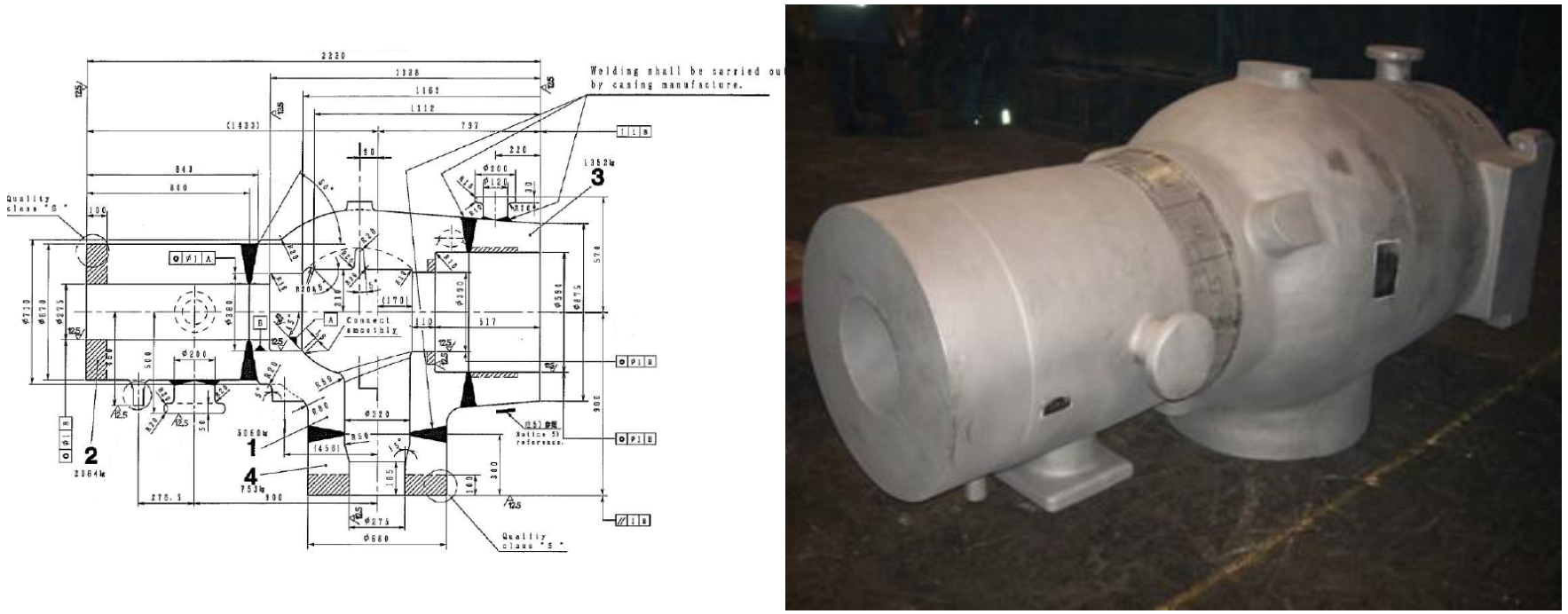


図3-14 高温弁ケーシング(Alloy625,約9ton)

4-5 実缶試験・回転試験

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
実缶試験・回転試験	試験設備の基本設計を完了する。	試験設備の基本設計を完了した	達成

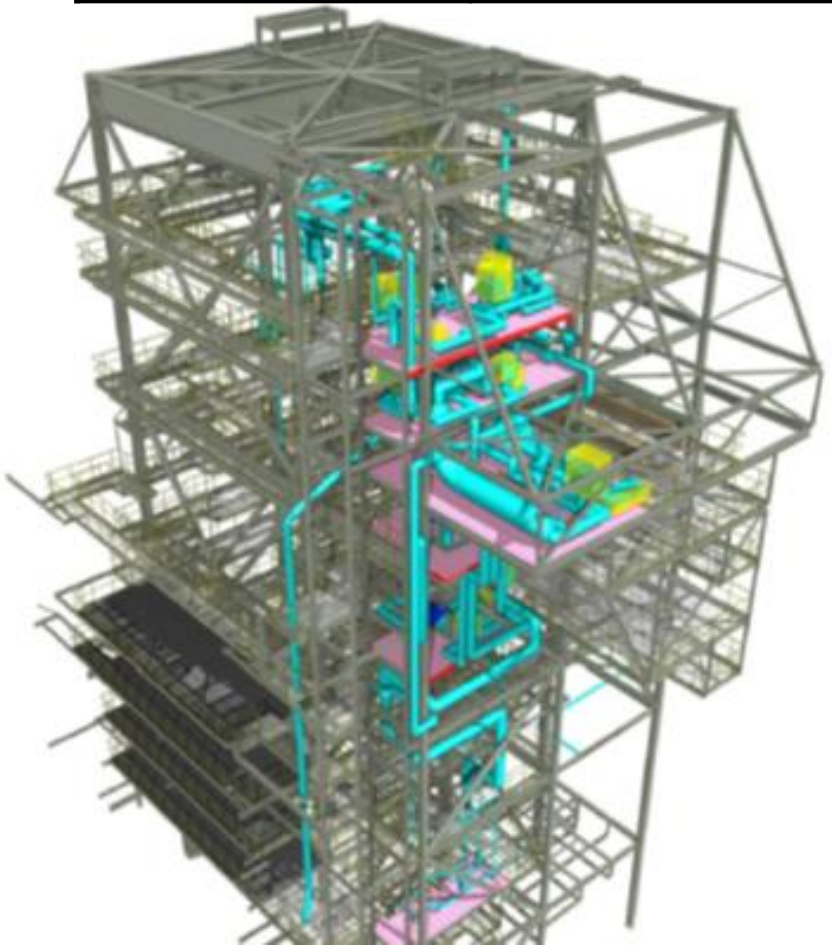
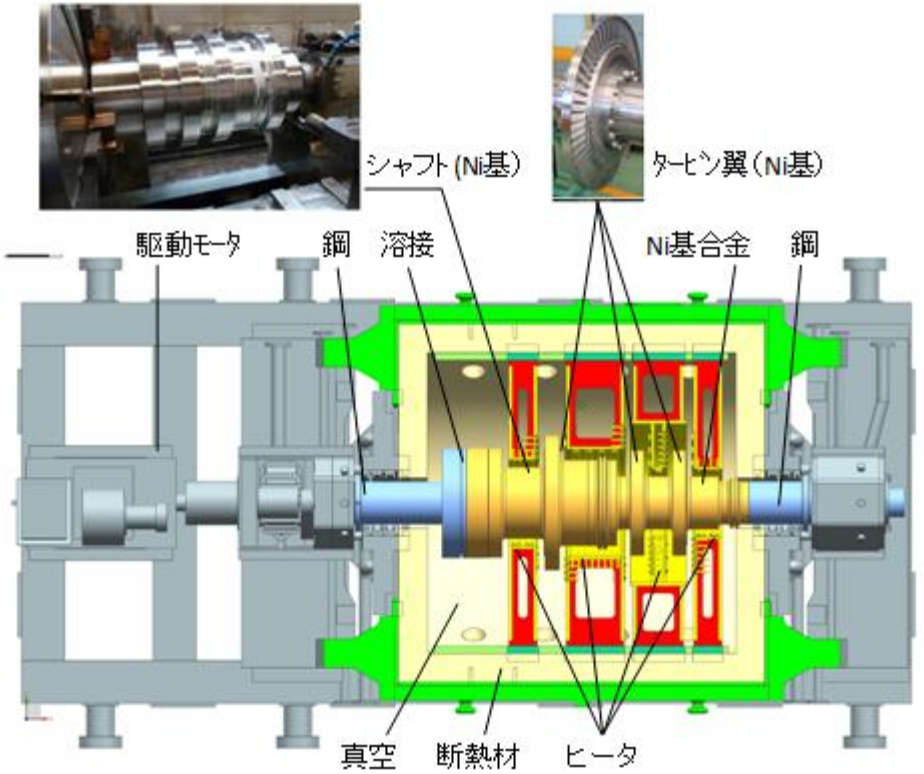


図3-15 実缶試験装置計画図



800℃のﾋｰﾀで輻射熱による700℃の高温場を模擬

図3-16　回転試験装置計画図

5. 事業化、波及効果

5-1 事業化

新設石炭火力や、経年化していく既設の石炭火力発電所の更新にはA-USC技術は欠かせないものになると考えられ、二酸化炭素削減要求が強まる中、今後本技術実用化への期待はさらに高まると推測される。そのような状況に配慮し、実用化へさらに短時間で至る道筋を探す必要がある。

事業化に向け本研究開発に引き続き実証機の建設及び運転を行うことにより、システム全体の信頼性、運用性、性能、材料の健全性、環境性等を総合的に評価、検証するべきである。

特に、ボイラでは最高温部材である過熱器、再熱器、ボイラとタービンを接続する大径管や大型高温弁の挙動、健全性、またタービンシステムや環境性といったシステム上の問題や耐久性の確認が主たる検証項目である。

5-2 波及効果

近年二酸化炭素排出量削減の観点からバイオマス燃料が脚光を浴びている。A-USC技術による石炭とバイオマス燃料の混焼は、バイオマス燃料を効率良く利用できる方法であり効果的な二酸化炭素削減に寄与できる。

6．研究開発マネジメント・体制等

6-1　事業体制

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、株式会社IHI，ABB日本ベーレー株式会社，岡野バルブ製造株式会社，新日鐵住金株式会社，東亜バルブエンジニアリング株式会社，株式会社 東芝，バブコック日立株式会社，株式会社日立製作所，富士電機株式会社，三菱重工業株式会社が経済産業省からの補助を受けて共同で実施している。

また、補助事業者以外の中部電力、電源開発、電力中央研究所、物質・材料研究機構、高効率発電システム研究所も開発に貢献している。

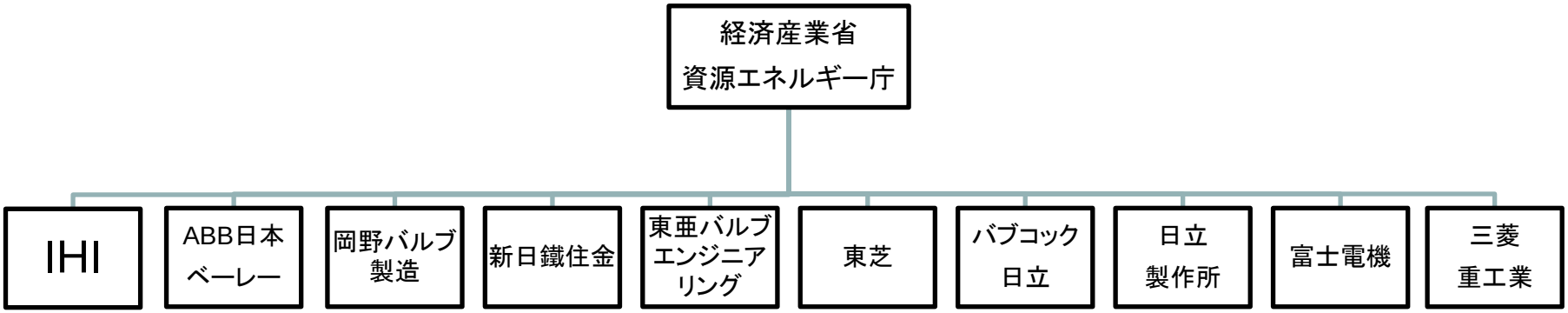


図5-2-1　事業体制

6-1　研究開発実施体制

研究開発を統括するために「A-USC開発推進委員会」を設置し、その下にタービン要素技術、ボイラ要素技術の統括するための「タービン分科会」、「ボイラ分科会」、「実缶試験分科会」を置いた。

開発メンバーには補助事業者以外に、中部電力、電源開発、電力中央研究所、物質・材料研究機構、高効率発電システム研究所がいる。

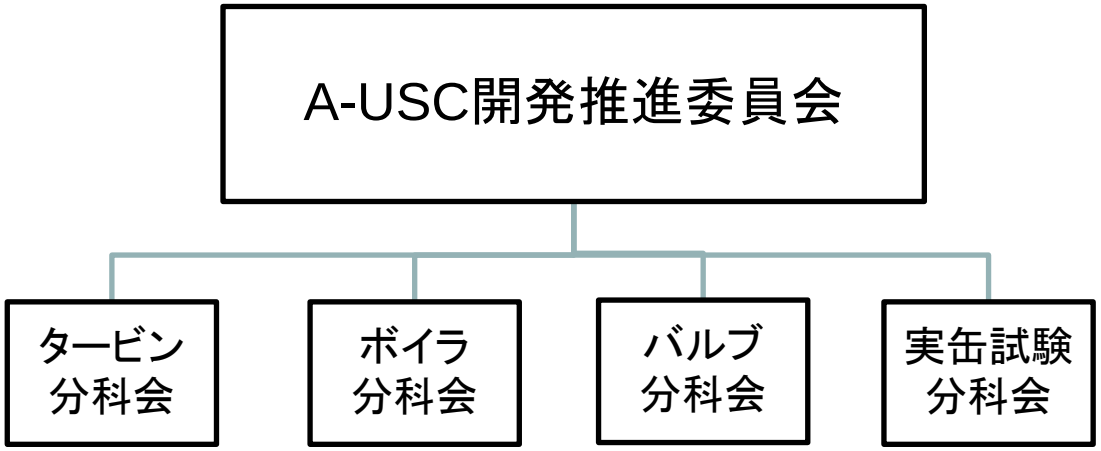


図5-2-1　事業体制

メンバー

- IHI
- ABB日本ベーレー
- 岡野バルブ製造
- 高効率発電システム研究所
- 新日鐵住金
- 中部電力
- 電源開発
- 電力中央研究所（非補助）
- 東亜バルブエンジニアリング
- 東芝
- バブコック日立
- 日立製作所
- 富士電機
- 物質・材料研究機構（非補助）
- 三菱重工業

オブザーバー

- 経済産業省
- 有識者
- 日本製鋼所

7. 前回の中間評価の結果

今後の研究開発の方向等に関する提言	提言に対する対処方針
○この技術は、高強度材そのものの開発とともに、その高強度材の溶接構造が研究の中核となっていることから、その長期信頼性が最も重要である。今後広い観点から検証し、説得力のあるデータの蓄積に努めてもらいたい。	○本事業の中核を担う材料や溶接技術等の技術に係る長期信頼性を確認するため、定期的な技術評価を行い、必要なデータを蓄積、検証していく。 【対応状況】 当初予定通りに長期耐久試験を進行し、3万時間程度まで来た。前回の中間評価では数千~1万時間程度であり、設計時間の10万時間より一桁短かったが、今回は1/3程度のところまで来た。今後10万時間を目指すが、現時点でほぼ見通しが得られたと考えられる。
○また、各企業が異なる材料を分担して効率的に開発を進めているが、プロジェクトの進展に伴って標準化や絞り込みを行うことも視野に入れて開発を進めていただきたい。	○共同開発企業による開発分担を明確にし、効率的な体制を構築するとともに、技術開発の絞り込みや開発スケジュールの最適化等事業の肥大化の抑制に努める。 【対応状況】 タービン、ボイラ分科会に加えバルブ分科会、実缶試験分科会を設置し、各社の開発分担を明確化した。また、タービン鋳物材料は試験結果を反映し一部絞り込んだ。弁材料も要素試験により絞り込んだ。
○さらに、研究開発体制について、大学のポテンシャルを有効活用し、産学官で事業に取り組むことにより国際性のある人材の育成にも貢献できるため、より一層の体制の構築に努めていただきたい。	○世界初の技術が多いなど革新技術の開発に当たっては、幅広い知識や技術が必要なため、産学官連携による研究開発及び人材育成の体制作りに努めていく。 【対応状況】 今後の課題である、材料の寿命評価技術の開発に、従来からこの分野で成果を挙げてきた大学（コンソーシアム）と研究を進めている。

開発分担

ボイラ

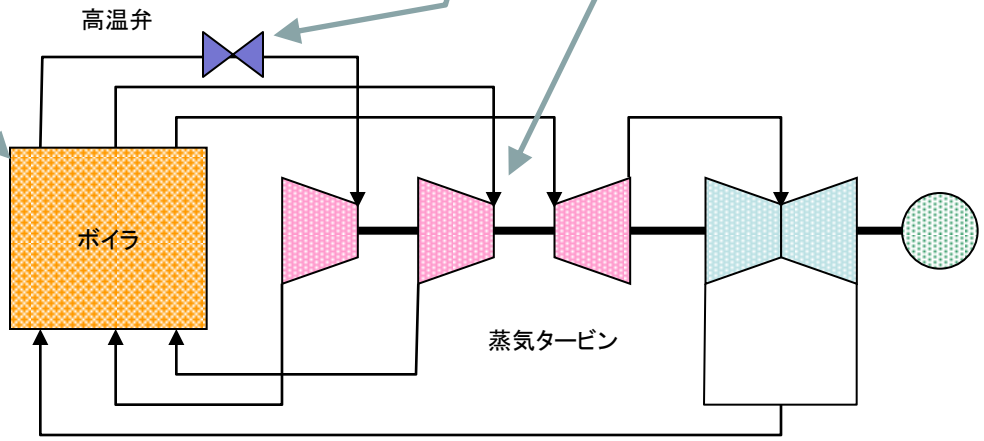
管材料製作　：新日鐵住金
管母材強度試験　：新日鐵住金
管母材疲労試験　：IHI
管母材水蒸気酸化試験：BHK（バブコック日立）
管母材高温腐食試験：MHI
管曲げ加工試験　：IHI, BHK, MHI
管溶接試験　：IHI, BHK, MHI
管母材, 溶接部長時間強度評価手法開発　：NIMS
溶接継手疲労・クリープ：電力中央研究所

高温弁

タービン弁開発　：富士電機（東芝, 日立, MHI協力）
ボイラ起動弁開発　：ABB日本ベーレー
一般弁、安全弁開発　：岡野バルブ、東亜バルブ

蒸気タービン

ロータ材料開発　：東芝, 日立, MHI
ケーシング材料試験　：東芝, 日立, MHI
翼, ボルト, 弁棒　：日立（一部東芝）



イットリウム系超電導電力機器
技術開発事業の概要について

平成25年11月13日

資源エネルギー庁電力基盤整備課
独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

目　次

１．プロジェクトの概要

２．目的・政策的位置付け

３．目標

４．成果、目標の達成度

５．事業化、波及効果

６．研究開発マネジメント・体制等

７．中間評価の結果

８．事後評価の結果（速報）

1．イットリウム系超電導電力機器技術開発事業の概要

概　　要	経済社会を支える重要なエネルギーである電力の一層の安定的かつ効率的な供給システムの実現に資するため、高機能部材である超電導線材を利用し、送電損失を大幅に低減することが可能な高温超電導ケーブル等の超電導電力機器を開発する。
実施期間	平成２０年度～平成24年度　（5年間）
予算総額	141億円（委託）

年度（平成）	20	21	22	23	24
予算（億円）	28	30	30	24	29

実 施 者	（公財）国際超電導産業技術センター、中部電力(株)、九州電力(株)、古河電気工業株式会社、(株)富士電機、住友電気工業(株)、(株)フジクラ、昭和電線ケーブルシステム(株)、(株)前川製作所、大陽日酸(株)、(株)三菱総研、（一財）ファインセラミックセンター
プロジェクトリーダー	塩原　融 （公財）国際超電導産業技術センター　超電導工学研究所（所長）

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け

政策・施策

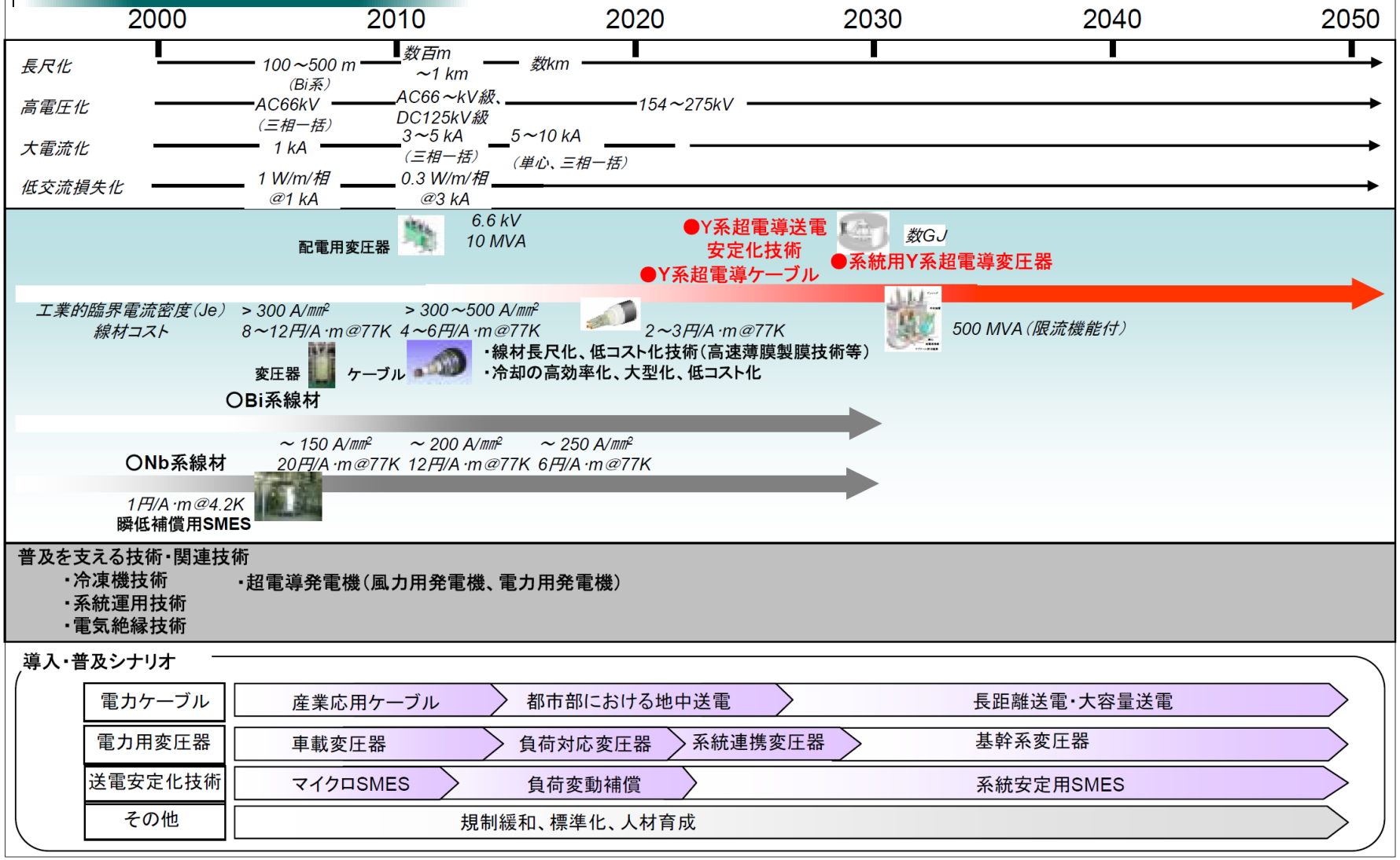
- 第3期科学技術基本計画（平成18～22年度）／平成18年3月閣議決定
  分野別推進戦略　　－エネルギー分野、ものづくり分野
- 第4期科学技術基本計画（平成23～27年度）／平成23年8月閣議決定
  3. グリーンイノベーションの推進　（2）重要課題達成のための施策の推進
  ｉ）安定的なエネルギー供給と低炭素化の実現
- イノベーションプログラム基本計画／平成20年4月 経済産業省策定
  エネルギーイノベーションプログラム
- Cool Earth－エネルギー革新技術計画／平成20年3月 経済産業省策定
  重点的に取り組むべきエネルギー革新「21」技術　－超電導高効率送電

イットリウム系超電導電力機器技術開発

- 超電導エネルギー貯蔵システム（SMES）
- 超電導ケーブル
- 超電導変圧器
- 超電導機器用線材
- 超電導機器適用技術標準化

Cool Earth エネルギー革新技術計画

技術開発ロードマップ　⑥ 超電導高効率送電



3. 目標

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
SMES[1*)]	2GJ級SMESの開発を見通す2MJ級モデルコイルシステムの評価試験モデルを設計し、電力系統制御SMESを模擬した2万回繰り返し充放電試験と同等レベルの信頼性・耐久性をもつコイル要素技術開発に向けて課題を抽出し、解決策を提案する。	SMES 実用化のために、充放電等による繰り返し応力に耐える信頼性の高いコイルを設計・製作できる技術を確立する必要があり、線材構造に起因したコイル特性変化現象について、線材の強度によらないコイル化技術を確立することで、高い信頼性、耐久性を有したコイル要素技術が確立できると考え、線材自体には応力が大きく係らない設計技術の確立をめざすこととした。
ケーブル	三相一括大電流ケーブルシステム（66kV-5kA,15m、直径150mm管路収納可能、終端接続部）、および単相単心高電圧ケーブルシステム（ 275kV-3kA, 直径150mm、30m、中間接続部、終端接続部）を作製し、送電損失（現行ケーブル1/2～1/3)を含めた性能検証を行う。	Y系超電導線材を使用することで大電流電力ケーブルの開発が可能となるが、これまで5kA級のケーブルシステムを開発した実績がないことから目標値を5kAとした。 また、同様に高電圧ケーブルシステムについては、DAPAS[2*)]プロジェクトにおける154kVが最も高い電圧階級であったがそれをしのぐ電圧を目標値とした。

＊1）SMES：Superconducting Magnetic Energy Storage（超電導エネルギー貯蔵装置）
＊2）DAPAS： Development of Advanced Power System by Applied Superconductivity technologies（韓国での超電導プロジェクト名称）

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
変圧器	66/6kV 20MVA級超電導変圧器システムが成立することを検証するため、2MVA級超電導変圧器モデルを作製・性能検証を行うとともに、数100kVA級単相モデルにより限流機能（過大電流を定格電流の3倍以下に抑制）を検証する。	配電用変圧器（66kV/6.9kV−20MVA級）を実現するために、それを見通す最低容量である2MVA級超電導変圧器モデルを製作し、性能検証を行うこととした。 また、数100kVA級単相限流機能付加変圧器の限流機能条件として、短絡電流は、定格電流の6倍程度に抑制される必要がある。本開発では、限流機能による抑制範囲を短絡電流の半分程度（定格電流の3倍以下）を目標とした。
電力機器用線材開発	各機器の実用化技術開発時に必要な仕様を満たす線材の作製技術の開発を行った上で、この線材を安定に製造できる技術とともに各電力機器の普及導入時（2020年頃）に必要な仕様を満たす線材の作製技術を開発する。	プロジェクト開始以前の開発により長尺高特性の線材の作製技術が開発され、機器の開発が開始できるレベルに到達している。ここで実用化を想定し、各電力機器の普及導入時に必要な仕様を満たし、安定した線材作製技術を開発することを目標とした。

4. 成果、目標の達成度

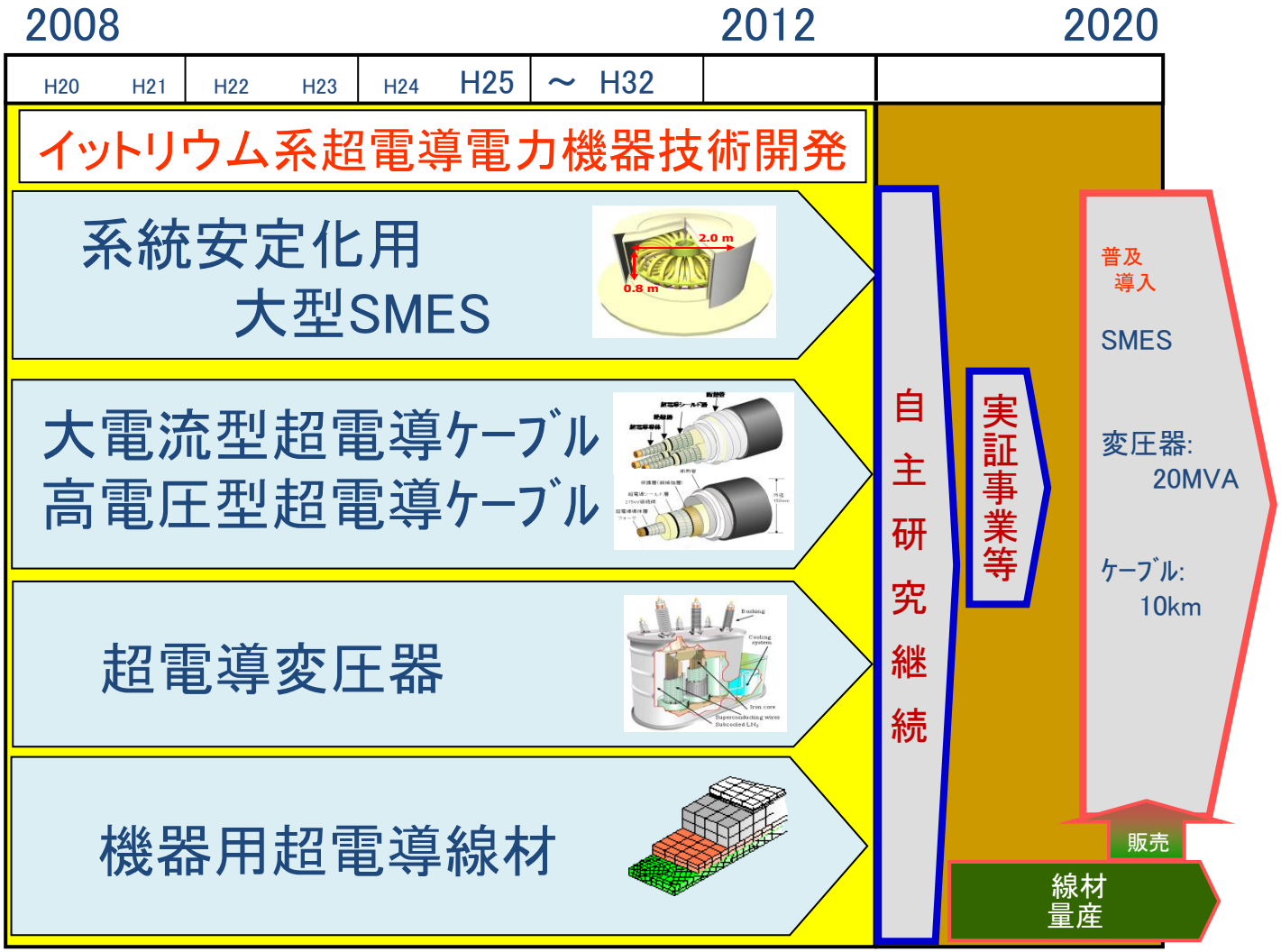
要素技術	目標・指標	成　果	達成度
SMES	2GJ級SMESの開発を見通す2MJ級モデルコイルシステムの評価試験モデルを設計し、電力系統制御SMESを模擬した2万回繰り返し充放電試験と同等レベルの信頼性・耐久性をもつコイル要素技術開発に向けて課題を抽出し、解決策を提案する。	2 GJ級SMES コイル基本システムの最適化を検討し、評価用試験モデルの内、伝導冷却試験システムの設計・製作を実施した。高強度で電磁応力や熱応力に優れた耐性を有するコイル構造（Yoroi-coil）を開発し、剥離やフープ応力耐性に対しての課題解決が図られた。	○
ケーブル	三相一括大電流ケーブルシステム（66kV−5kA,15m、直径150mm管路収納可能、終端接続部）、および単相単心高電圧ケーブルシステム（ 275kV−3kA,直径150mm、30m、中間接続部、終端接続部）を作製し、送電損失（現行ケーブル1/2～1/3)を含めた性能検証を行う。	66 kV 大電流ケーブルシステム検証では15 m 長ケーブルシステムを製造し、課通電試験*3)等を実施し試験計画書の性能を満足することを検証した。275 kV 高電圧ケーブルシステム検証では、中間接続部を有する30 m 長ケーブルシステムを製造し、課通電試験等を実施し試験計画書の性能を満足することを検証した。	○

＊3）課通電試験：課電状態（電圧をかけた状態）で、通電させる試験

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
変圧器	66/6kV 20MVA級超電導変圧器システムが成立することを検証するため、2MVA級超電導変圧器モデルを作製・性能検証を行うとともに、数100kVA級単相モデルにより限流機能（過大電流を定格電流の3倍以下に抑制）を検証する。	66 kV/6.9 kV-2 MVA 級超電導変圧器モデルを試作し、冷却システムと組み合わせて変圧器システムの性能を確認した。400kVA 級限流機能付加単相変圧器モデルを試作し、短絡電流を定格電流の3 倍以下に抑制する限流性能を確認した。	○
電力機器用線材開発	各機器の実用化技術開発時に必要な仕様を満たす線材の作製技術の開発を行った上で、この線材を安定に製造できる技術とともに各電力機器の普及導入時（2020年頃）に必要な仕様を満たす線材の作製技術を開発する。	上記、各機器の開発項目に適応する線材の作成し、目的を達成した。	○

5. 事業化、波及効果

プロジェクト終了後の実用化への見通し



「高温超電導電力機器の適用拡大と標準化に資するケーススタディ」検討結果

超電導ケーブルの実適用時期について

2013　2015　2020　2025　2030

鉄道変電所間連絡線
（き電補助線）

・直流1.5kV, 12kA
・長さ　3km程度
☆大電流用 ケーブル/端末
事故への対応策明確化

揚水発電所引出線

・交流 22kV, 12kA
・長さ　100m程度
☆冷凍機を含めた高信頼性化

高圧地下ケーブル

・交流 275kV, 3kA
・長さ　20km程度
☆交流損失の低減
超電導材料のコスト低減

（直流）

（交流：電力系統）

都市地下ケーブル

・交流 66/77kV, 5kA
・長さ　5-20km程度
☆冷凍システムのコスト低減

適用のために
必要な開発

安全性・信頼性の確認とその向上

コストダウン

成果実績1（プレスリリース）

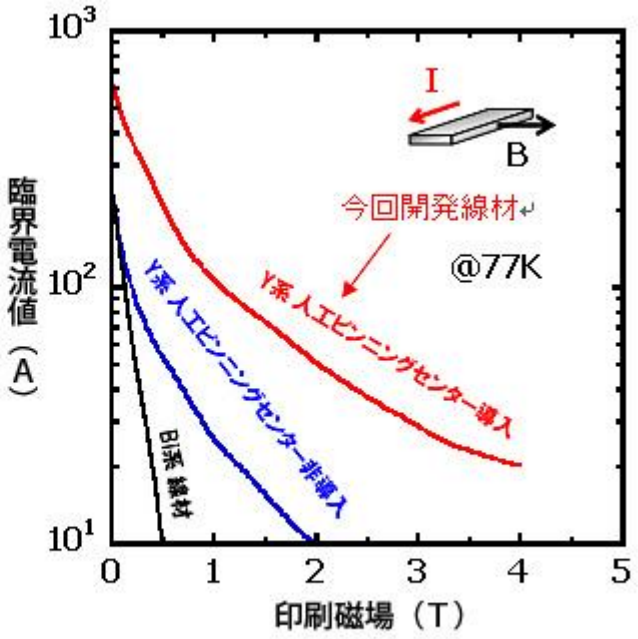
先進型イットリウム系超電導線材の低コスト長尺製造技術を確立

2013年6月19日

NEDOの「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の実施者である昭和電線ケーブルシステム株式会社、公益財団法人国際超電導産業技術研究センター（ISTEC）は、イットリウム系超電導線材＊1について、「ナノ粒子分散型人工ピン」導入技術を用い、高磁場中での臨界電流特性を大幅に改善した先進型イットリウム系線材（Nano-Particle Artificial-pinning-center Distributed YBCO:nPAD-YBCO）の長尺製造に成功、低コスト型線材の磁場中特性で世界最高性能を達成しました。

この度開発した先進型イットリウム系線材の臨界電流密度は、液体窒素冷却下・3テスラ中で線材単位断面積（1平方センチメートル）あたり20万アンペア。その時の臨界電流値は1cm幅線材で50アンペアを超え、溶液塗布熱分解法＊3で作製した長尺線材としては世界最高値を達成しました。

今回開発した線材外観



各線材の磁場中特性比較

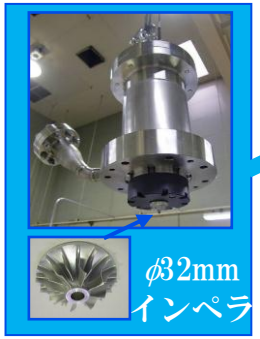
成果実績2（プレスリリース）

世界初の超電導電力機器冷却用ターボ冷凍機の販売を開始

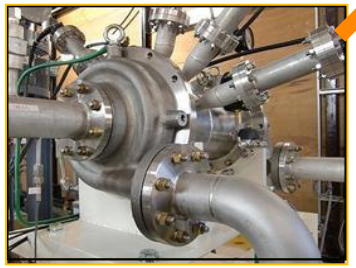
平成25年5月8日

空気分離装置や各種液化機をはじめとする低温関連機器の製作・運転により培った技術をもとに独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「イットリウム系超電導電力機器技術開発（平成20～24 年度）」プロジェクトに参画し、超電導電力機器の冷却に適した長期間メンテナンスが不要となる2kW 冷凍機を開発しました。本冷凍機は上記プロジェクトにて**世界初の2MVA 級超電導変圧器の冷却に使用され、通電実験の成功にも貢献**しています。

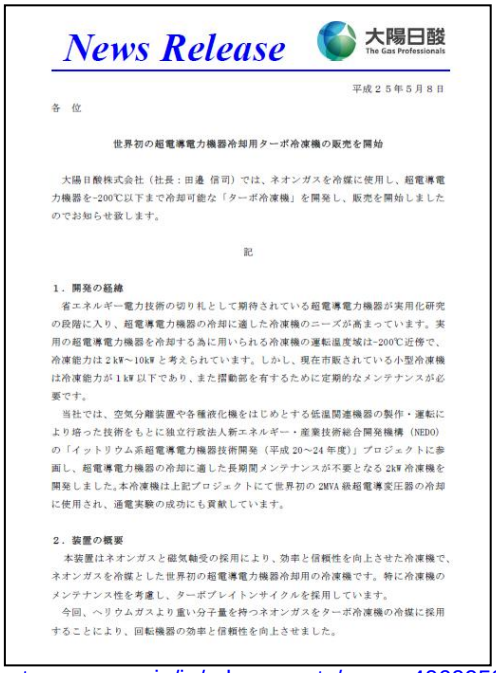
膨張タービン



ターボ圧縮機



保冷容器（熱交換器を収納）



News Release　大陽日酸 The Gas Professionals

平成２５年５月８日

各　位

世界初の超電導電力機器冷却用ターボ冷凍機の販売を開始

大陽日酸株式会社（社長：田邉 信司）では、ネオンガスを冷媒に使用し、超電導電力機器を−200℃以下まで冷却可能な「ターボ冷凍機」を開発し、販売を開始しましたのでお知らせ致します。

記

１．開発の経緯

省エネルギー電力技術の切り札として期待されている超電導電力機器が実用化研究の段階に入り、超電導電力機器の冷却に適した冷凍機のニーズが高まっています。実用の超電導電力機器を冷却する為に用いられる冷凍機の運転温度域は−200℃近傍で、冷凍能力は２kW～10kW と考えられています。しかし、現在市販されている小型冷凍機は冷凍能力が１kW 以下であり、また摺動部を有するために定期的なメンテナンスが必要です。

当社では、空気分離装置や各種液化機をはじめとする低温関連機器の製作・運転により培った技術をもとに独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「イットリウム系超電導電力機器技術開発（平成 20～24 年度）」プロジェクトに参画し、超電導電力機器の冷却に適した長期間メンテナンスが不要となる 2kW 冷凍機を開発しました。本冷凍機は上記プロジェクトにて世界初の 2MVA 級超電導変圧器の冷却に使用され、通電実験の成功にも貢献しています。

２．装置の概要

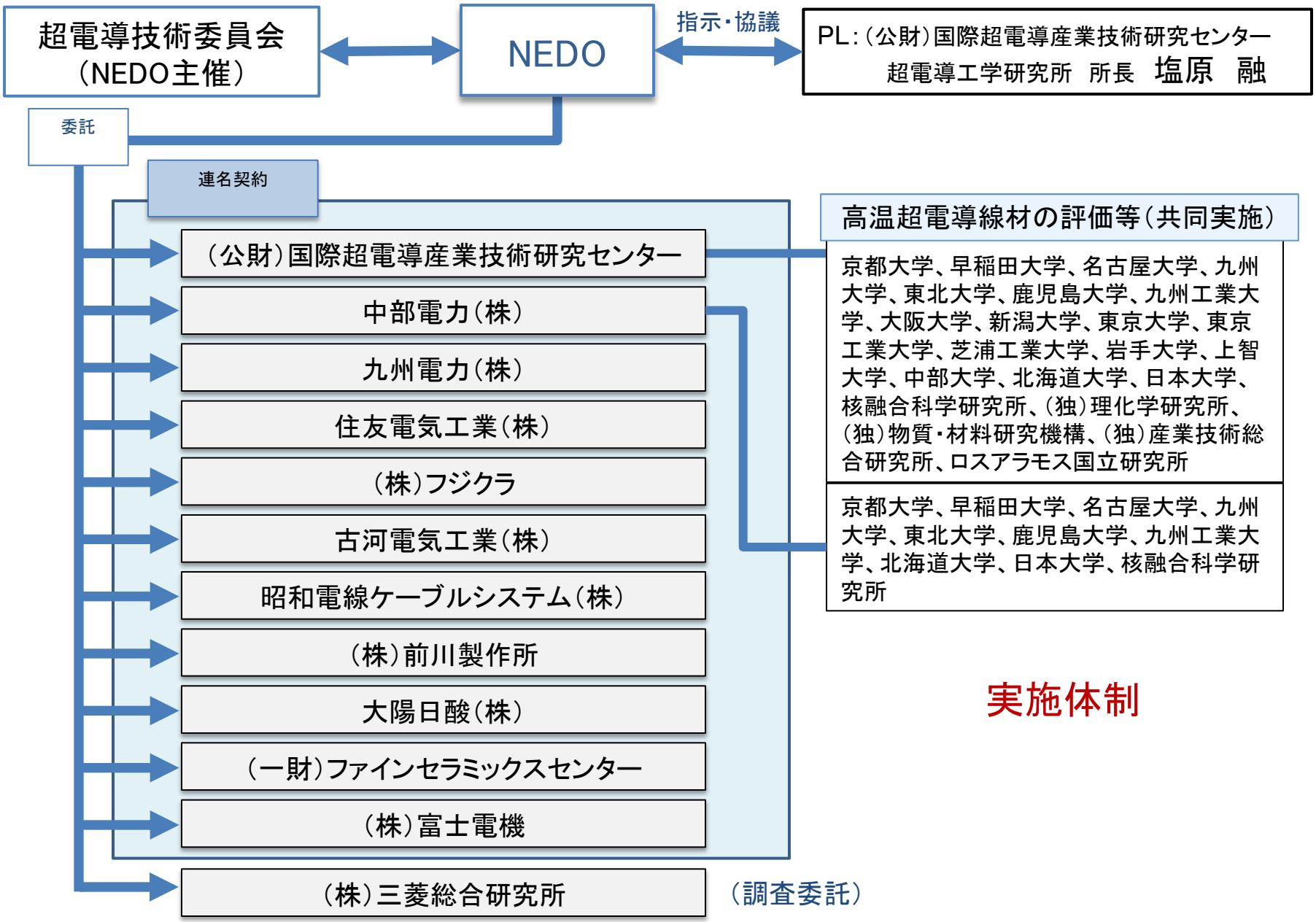
本装置はネオンガスと磁気軸受の採用により、効率と信頼性を向上させた冷凍機で、ネオンガスを冷媒とした世界初の超電導電力機器冷却用の冷凍機です。特に冷凍機のメンテナンス性を考慮し、ターボブレイトンサイクルを採用しています。

今回、ヘリウムガスより重い分子量を持つネオンガスをターボ冷凍機の冷媒に採用することにより、回転機器の効率と信頼性を向上させました。

http://www.tn-sanso.co.jp/jp/_documents/news_40609509.pdf

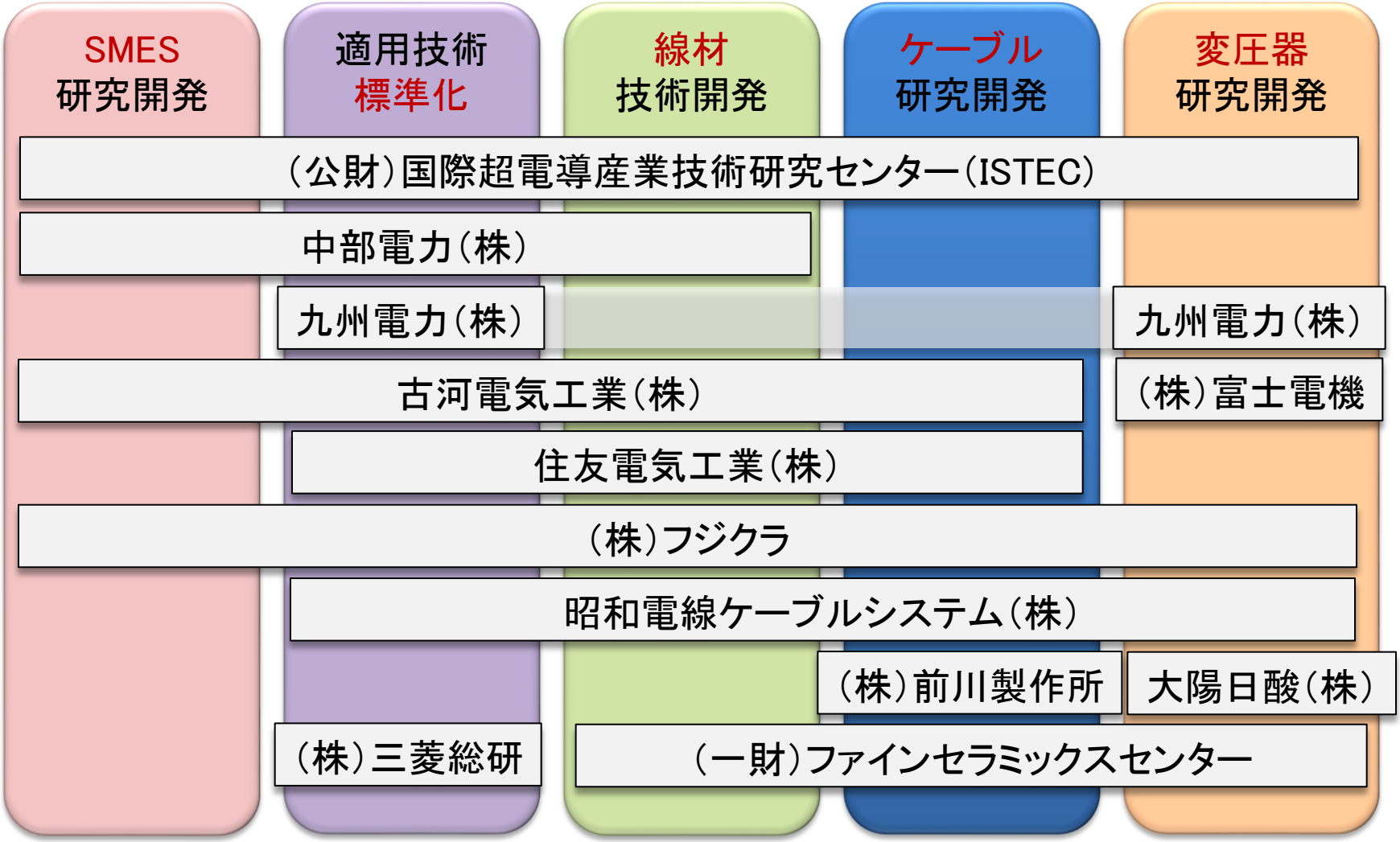
プロジェクト終了後 販売開始

6. 研究開発マネジメント・体制等



研究開発マネジメント体制

研究開発項目と担当した実施者



イットリウム系超電導電力機器技術開発 ー 事業費

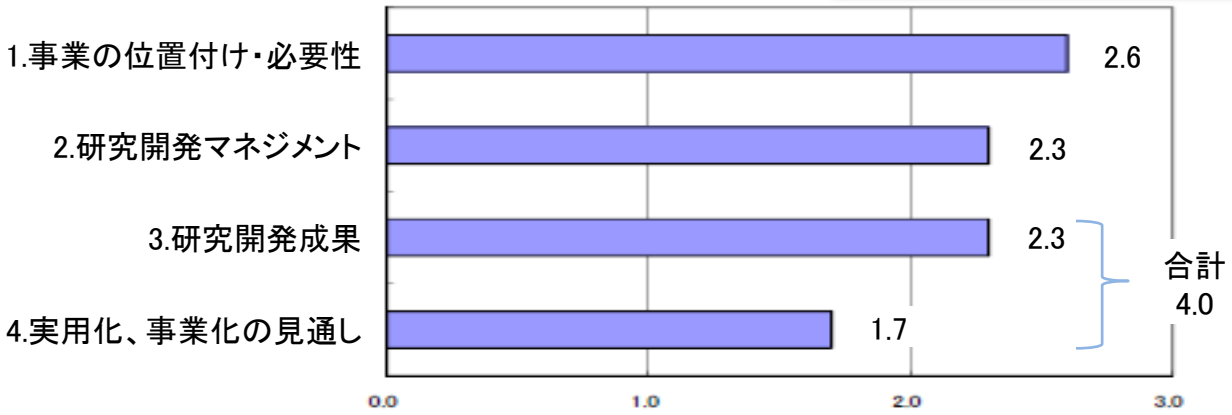
開発項目	H20fy	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy	Total
SMES	484	502	506	75	79	1,646
ケーブル	542	693	585	938	1,154	3,912
変 圧 器	584	598	657	778	773	3,389
線　材	1,147	1,134	1,214	622	899	5,019
標 準 化	18	15	20	19	25	96
合　計	2,775	2,944	2,982	2,431	2,931	14,062

（単位：百万円）

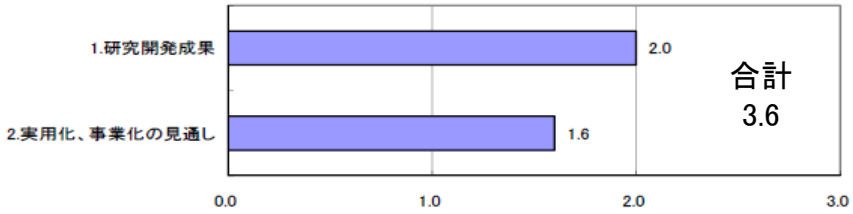
7. 中間評価の結果

基本計画の中間目標は
すべて達成（評価時見込のものを含む）

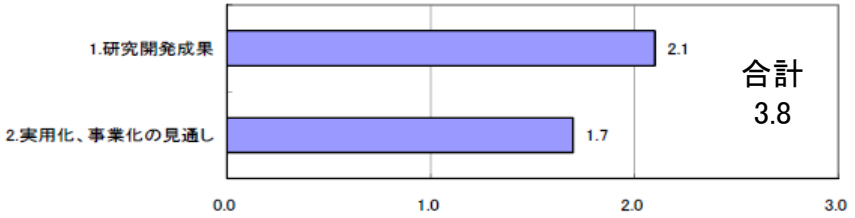
プロジェクト全体



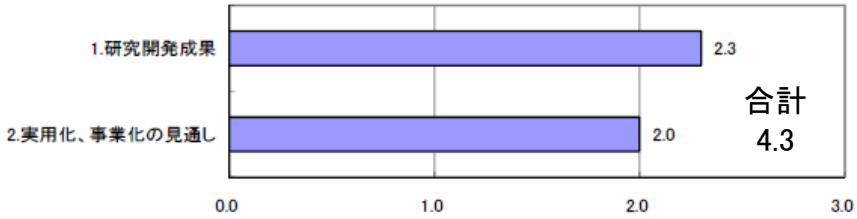
超電導電力貯蔵システム（SMES）の研究開発



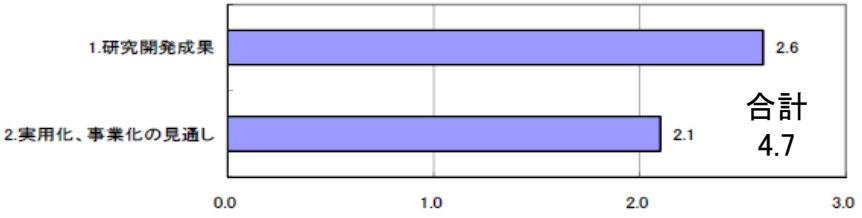
超電導変圧器の研究開発



超電導電力ケーブルの研究開発



超電導機器用線材の研究開発



＊各項目につき3.0点満点で評価

「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の目標変更について

中間評価結果の反映

総　論

	問題点・改善すべき指摘点	対処方針と反映
研究開発マネジメント	この3年間の研究費配分をみると、課題ごと、年度ごとのメリハリがなく、重点的に研究開発すべき項目には予算的な措置を強化するなど、もっとダイナミックな予算配分を行っても良い。	メリハリのある予算配分の実施 PJ後半では、電力送配電設備の更改等ニーズが明確な電力ケーブル、変圧器の開発に重点化する。変圧器に関しては、超電導変圧器モデルの試作に移行し、そのための実施者を公募して体制を強化する。SMESは基本要素開発に縮小する。
研究開発成果	線材の量産化・歩留まり改善と低コスト化の実現と、剥離の課題解決が最も肝要であり、これらが達成できないと機器開発は空転する。	線材の課題解決への対応強化 ご指摘を踏まえ、基本計画において線材開発テーマを独立させ、取り組みの重点化を図る。

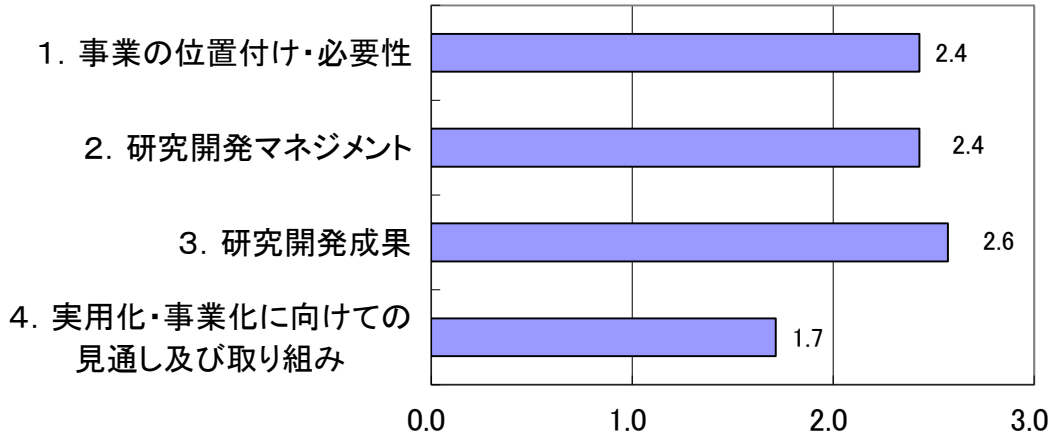
基本計画等へ反映

①SMESの研究開発

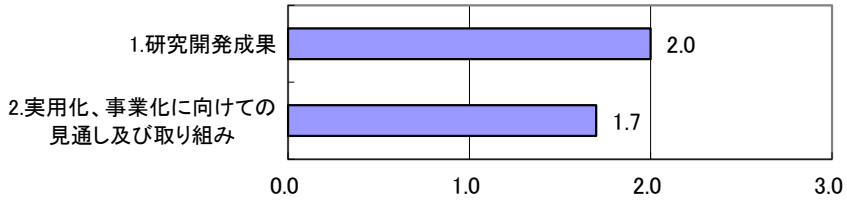
研究開発成果	実際に大型のコイル試作まで行わないと、磁場中での繰り返し通電の課題や接続部の構成の最適方法などはっきりできない。、線材で長物ができずに継ぎ接ぎになる場合に関して、早急に見直しを含めた機器設計を行う必要がある。	実用化に向けた課題の整理と反映 SMESに必要な線材の開発についてテーマを独立させ、剥離等の検証等取組の強化を図り、まずは性能及び信頼性を明確にする。

8. 事後評価の結果（速報）

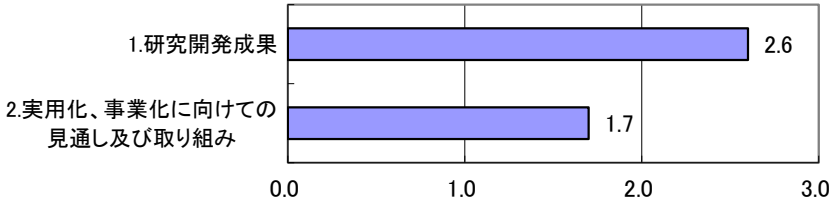
プロジェクト全体



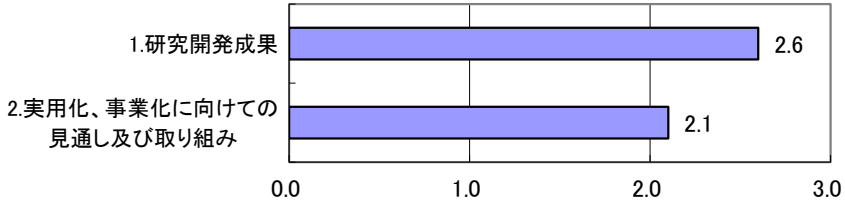
超電導電力貯蔵システム（SMES）の研究開発



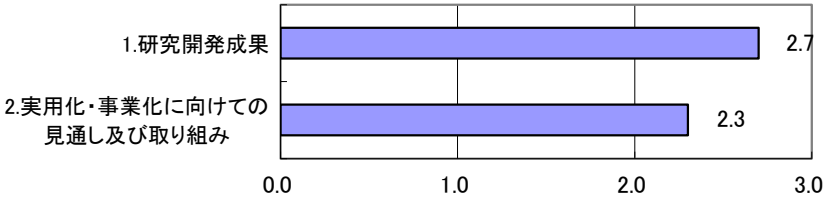
超電導変圧器の研究開発



超電導電力ケーブルの研究開発



超電導機器用線材の研究開発



＊各項目につき3.0点満点で評価

次世代型双方向通信出力制御実証事業の概要について

平成25年11月13日

電力・ガス事業部　電力基盤整備課

補助事業者33法人

目　次

１．プロジェクトの概要

２．目的・政策的位置付け

３．目標

４．成果、目標の達成度

５．事業化、波及効果

６．研究開発マネジメント・体制等

７．事前評価結果

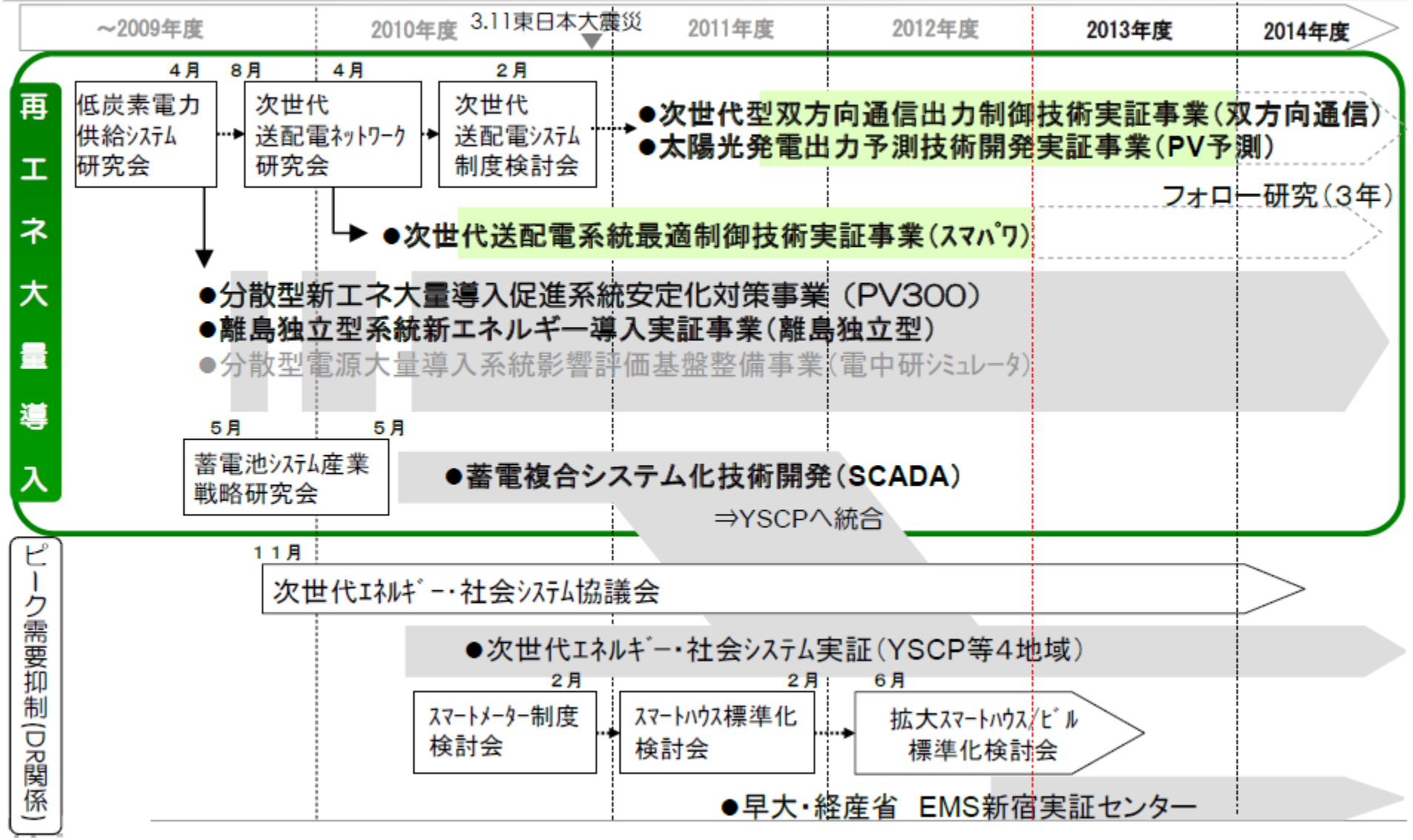
1．次世代型双方向通信出力制御実証事業の概要

概　　要	太陽光発電の大量導入に備え、系統状況によって外部からの通信信号に応じて出力をコントロールできる太陽光発電用PCS（Power Conditioning System: 直流交流変換装置）を開発するとともに、通信と組み合わせた実証試験を実施する。
実施期間	平成23年度～平成25年度（3年間）
予算総額	13．7億円 （補助率1/2）
実 施 者	東京大学、東京工業大学、早稲田大学、KDDI、NRIセキュアテクノロジーズ、沖電気工業、オムロン、NTTドコモ、関電工、高岳製作所、東芝、日立製作所、三洋電機、シャープ、住友電気工業、日新電機、日本アイ・ビー・エム、日本電気、パナソニックシステムネットワークス、富士電機、三菱電機、富士通、電力中央研究所、北海道電力、東北電力、東京電力、中部電力、北陸電力、関西電力、中国電力、四国電力、九州電力、沖縄電力
プロジェクトリーダー	横山　明彦　東京大学　教授

年度（平成）	23	24	25
予算（億円）	8.0	4.6	1.1

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け

実証プロジェクトの国の研究会との関係と実証期間



2. プロジェクトの目的・政策的位置付け

～次世代送配電制御,次世代双方向通信,PV出力予測の実証体制～

次世代配電制御方式
早大,富士電機,明電舎

次世代配電制御機器開発
東工大,日立,TMEIC,電中研

需給制御技術・PV余剰対策評価
東大,東芝,三菱電機,日立,
伊藤忠商事,伊藤忠ﾃｸﾉｿﾘｭｰｼｮﾝｽﾞ

通信標準化調査,ｾｷｭﾘﾃｨ検討
電中研,NRIｾｷｭｱﾃｸﾉﾛｼﾞｰｽﾞ

需要制御技術・宅内機器制御
東大,東芝,日立,三菱電機,ｼｬｰﾌﾟ,
ﾀﾞｲｷﾝ,NEC,ﾊﾟﾅｿﾆｯｸｼｽﾃﾑﾈｯﾄﾜｰｸｽ,三菱自動車,関電工,電中研

次世代送配電系統最適制御技術実証
（28法人）

各種双方向通信方式を用いた実証試験
東大,日立,東芝, NEC,
ﾊﾟﾅｿﾆｯｸｼｽﾃﾑﾈｯﾄﾜｰｸｽ,
富士通,三菱電機,沖電気,
KDDI,NTTドコモ,
住友電工,日本IBM,
NRIｾｷｭｱﾃｸﾉﾛｼﾞｰｽﾞ,
高岳製作所,関電工,(青森県)

各電力会社

日射強度把握・予測技術
日本気象協会,電中研,
伊藤忠ﾃｸﾉｿﾘｭｰｼｮﾝｽﾞ

PV出力推定技術
日立,三菱電機,
ｿｰﾗｰﾌﾛﾝﾃｨｱ,電中研,
伊藤忠ﾃｸﾉｿﾘｭｰｼｮﾝｽﾞ

日射分析
東大

太陽光発電出力予測技術開発実証
（17法人）

双方向通信機能や電圧調整機能付きPCS開発
早大,東工大,ｼｬｰﾌﾟ,ｵﾑﾛﾝ,東芝,三菱電機,三洋電機,日新電機,富士電機,
高岳製作所,関電工

次世代型双方向通信出力制御実証
（33法人）

全参加法人：41法人

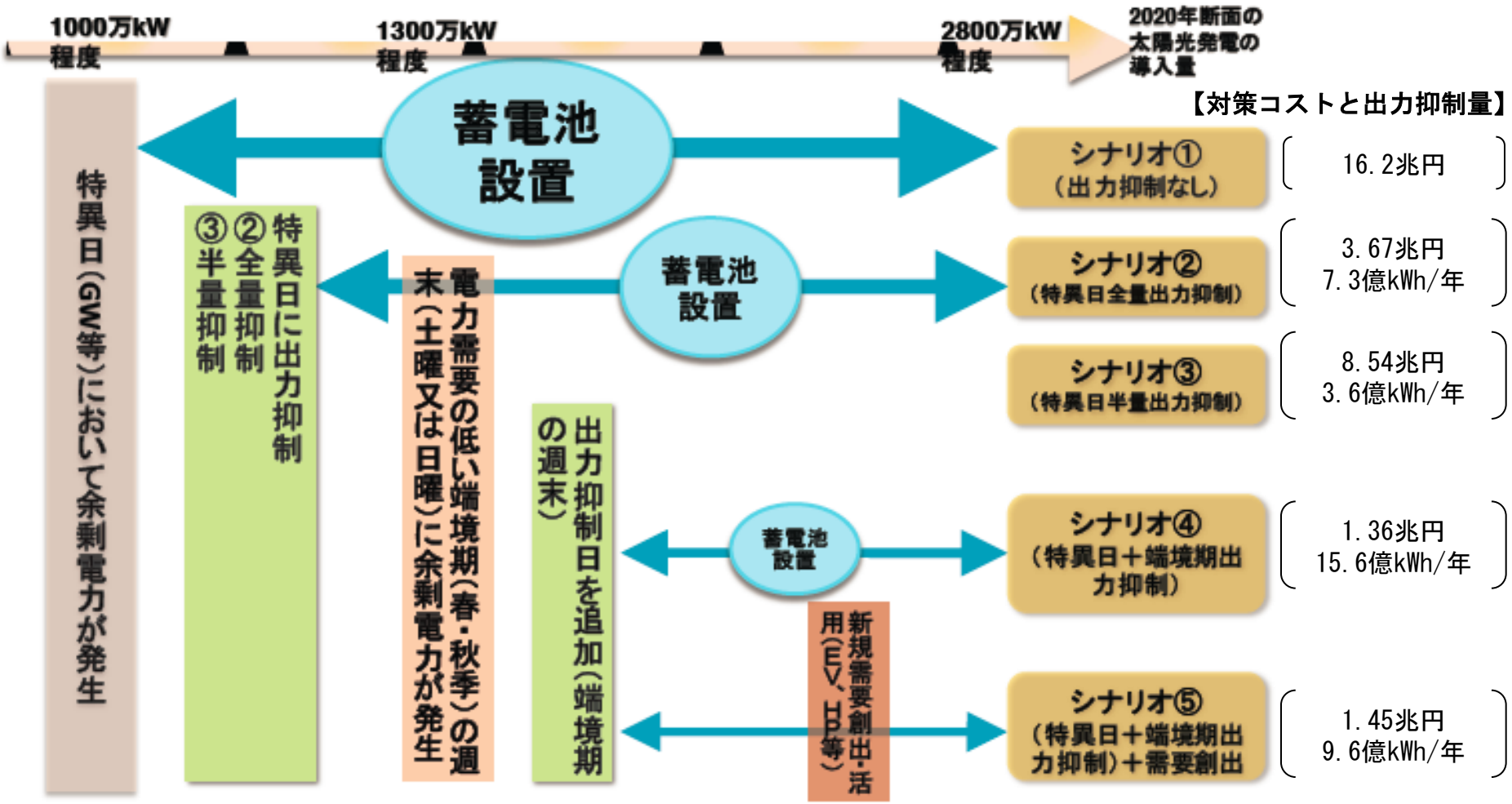
◆大学,研究機関等
東大,東工大,早大,電中研,
日本気象協会

◆メーカー等
日本ｱｲ・ﾋﾞｰ・ｴﾑ,伊藤忠商事,
伊藤忠ﾃｸﾉｿﾘｭｰｼｮﾝｽﾞ,NEC,
NRIｾｷｭｱﾃｸﾉﾛｼﾞｰｽﾞ,NTTドコモ ,沖電気,ｵﾑﾛﾝ,関電工, KDDI,三洋電機,ｼｬｰﾌﾟ,住友電工,ｿｰﾗｰﾌﾛﾝﾃｨｱ,ﾀﾞｲｷﾝ,高岳製作所, TMEIC,東芝,日新電機,ﾊﾟﾅｿﾆｯｸｼｽﾃﾑﾈｯﾄﾜｰｸｽ, 日立,富士通,富士電機,三菱自動車,三菱電機,明電舎,

◆電力会社
北海道,東北,東京,中部,関西,北陸,
中国,四国,九州,沖縄

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け

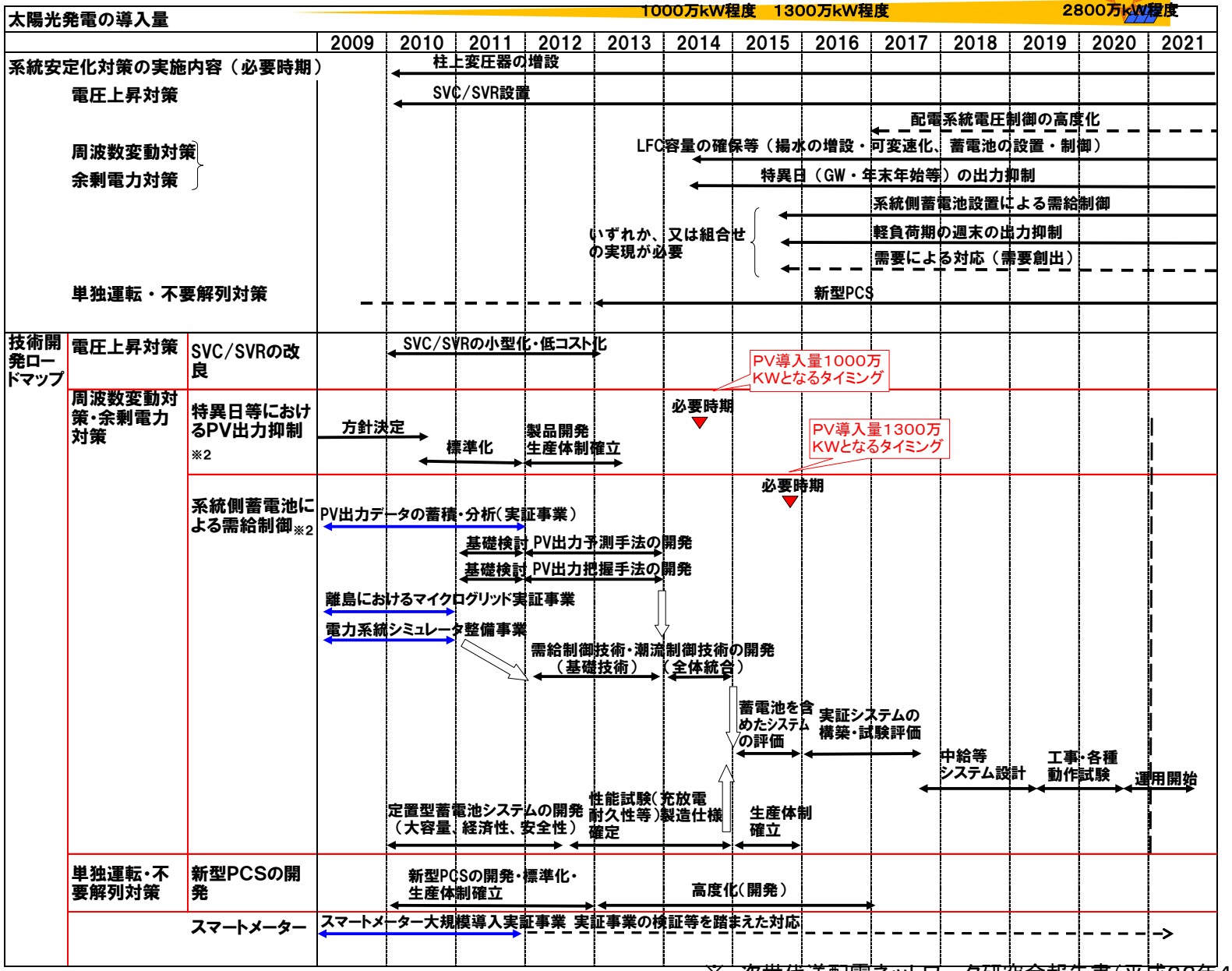
系統安定化対策化シナリオと余剰電力対策量試算の考え方



※ 次世代送配電ネットワーク研究会報告書（平成22年4月）

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け

次世代送配電ネットワーク構築に向けたロードマップ



※　次世代送配電ネットワーク研究会報告書（平成22年4月）より抜粋

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け

事業の内容

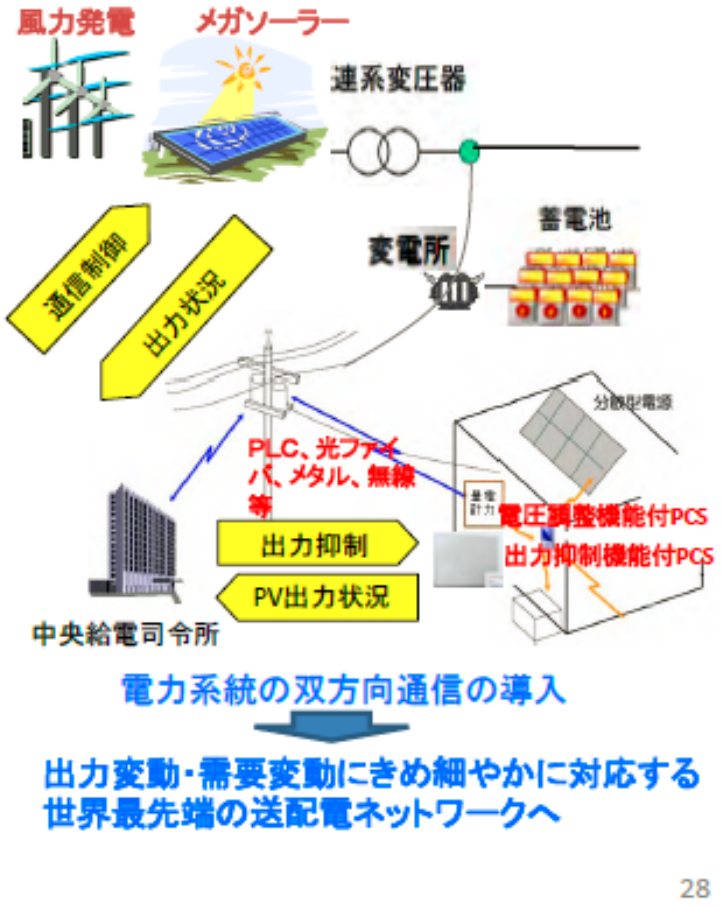
事業の目的

- 太陽光発電の大量導入に伴う電力系統安定化対策について、余剰電力対策コストの削減の観点からゴールデンウィーク等の特異日における出力抑制が検討されています。
- 現在のところ、再生可能エネルギー電源の通信制御は、世界的に見ても行われておらず、今後の我が国のスマートグリッドの国際展開においても非常に有効なツールになり得ると考えられています。
- 太陽光発電の設置者等の機会損失（出力抑制）を最小限に抑えるため、将来的にきめ細やかな出力抑制を行うことが可能な通信機能を用いた太陽光発電等の出力抑制について、電力系統の双方向通信の導入にあわせて実証を行います。

事業の概要

1. 通信手段による出力抑制機能付きPCSの開発、実証
2. 通信手段による電圧調整機能付きPCSの開発、実証
3. 双方向通信の導入に向けた通信手段（PLC、光ファイバ、メタル、無線等）の実証
4. メガソーラーや風力発電所等の通信制御の実証
5. 住宅用太陽光発電の通信制御の実証

事業イメージ



※ www8.cao.go.jp/cstp/budget/saisyu/sanko40.pdf より引用

3. 目標

太陽光発電大量導入に備え、系統状況によって外部からの通信信号に応じて出力をコントロールできる太陽光発電用PCSを開発するとともに、通信と組み合わせた検証試験を実施する。

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
①通信による出力制御が可能な太陽光PCS（住宅用、事業用）	・通信機能付き太陽光発電用PCSの開発 ・通信信号に応じて出力をコントロールできること	現状の太陽光発電用PCSにデータ通信によって制御信号などの授受を行う機能を付加することにより遠隔での制御の実現可能性を確認するため。
②通信による出力制御が可能な蓄電池用PCS	・通信機能付き蓄電池用PCSの開発 ・通信信号に応じて出力をコントロールできること	現状の蓄電池用PCSに、データ通信によって制御信号などの授受を行う機能を付加することにより遠隔での制御の実現可能性を確認するため。

3. 目標

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
③電圧調整機能付きPCS	・シミュレーション等の検討による最適な制御方式の選定、その機能を具備したPCSの試作 ・安定的に動作すること	選定された制御方式を具備した電圧調整機能付きPCSが安定的に機能しているか確認するため。
④双方向通信機器	・PCSの出力制御を実現する種々の双方向通信機器の開発 ・安定的かつ確実に動作すること	電力会社が保有する通信網（光ファイバー、メタルケーブルなど）、通信事業者による広域サービス（携帯電話、WiMAXなど）を有効に活用しつつ、ローカルに通信網を形成するための無線LAN、特小無線（900MHz帯、400MHz帯）や、電線そのものをインフラとして活用する電力線搬送（PLC）がPCS制御の要件を満たしていることを確認するため。

3. 目標

要素技術	目標・指標	妥当性・設定理由・根拠等
⑤サイバーセキュリティ関連機器	・通信ネットワークに内在する脆弱性の検討・セキュリティ技術の開発 ・想定される攻撃からネットワークを保護できること	双方向通信によって、太陽光発電や蓄電池を含む機器・システムを制御する状況では、相応のセキュリティ確保が必要であるため。

3. 目標

目標達成に向けた取り組み

項目		仕様	開発	評価	担当法人
①太陽光発電用PCS （住宅用、事業用）		インターフェース 共通仕様	機器開発	フィールド試験	オムロン、東芝、三洋電機、シャープ、三菱電機、高岳製作所、日新電機
②蓄電池用PCS		基本仕様	機器開発	フィールド試験	関電工、高岳製作所
③電圧調整機能付きPCS		方式選定 PCSの基本仕様	機器開発	工場試験	東芝、富士電機
④双方向通信機器	センターサーバ	ー	機器開発	フィールド試験	日立製作所
	通信アダプタ				日本電気
	汎用通信ソフト				日本アイ・ビー・エム
	公衆無線網 （携帯電話、WiMAX）				NTTドコモ、KDDI
	特定小電力無線 （900MHz、400MHz）				三菱電機、パナソニックシステムネットワークス、東芝、沖電気工業、日立製作所
	PLC				住友電気工業
	無線LAN				パナソニックシステムネットワークス、富士通
⑤サイバーセキュリティ関連機器		対策方針	ー	フィールド試験	NRIセキュアテクノロジーズ

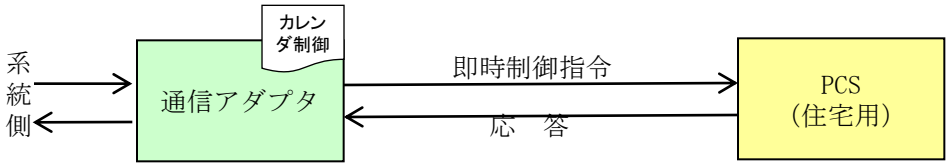
4. 成果、目標の達成度

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
①通信による出力制御が可能な太陽光PCS（住宅用、事業用）	・通信機能付き太陽光発電用PCSの開発 ・通信信号に応じて出力をコントロールできること	通信による出力制御実証試験を行う機能を検討し、通信装置とのインターフェースの共通仕様を取り纏め、それらを具備する機器開発を実施し、開発機器の動作試験および通信装置との接続試験を実施した。また現在、実環境へPCSを設置しフィールド試験を実施中であり、結果は良好である。事業終了時には全評価が完了する見込みである。	達成

4. 成果、目標の達成度

◎太陽光発電用PCSの開発

○インターフェース共通仕様（プロトコル仕様）



アプリケーション層	―	―
プレゼンテーション層	ECHONET Lite	ECHONET Lite
セッション層		
トランスポート層	―	UDP
ネットワーク層	―	IP
データリンク層	調歩同期	Ethernet
物　理　層　・・・	RS-485	―

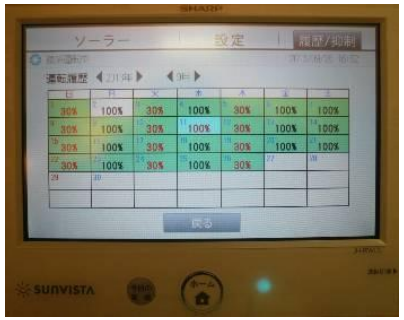
○各社のPCS

三洋電機製PCS（家庭用）

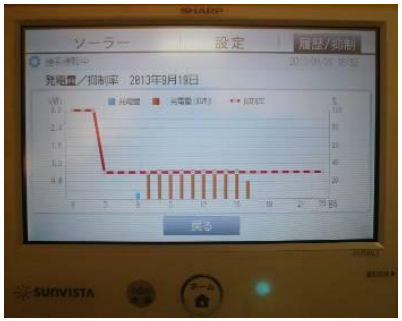
三菱電機製PCS（家庭用）

日新電機製PCS（事業用）

高岳製作所製PCS（事業用）



運転履歴情報

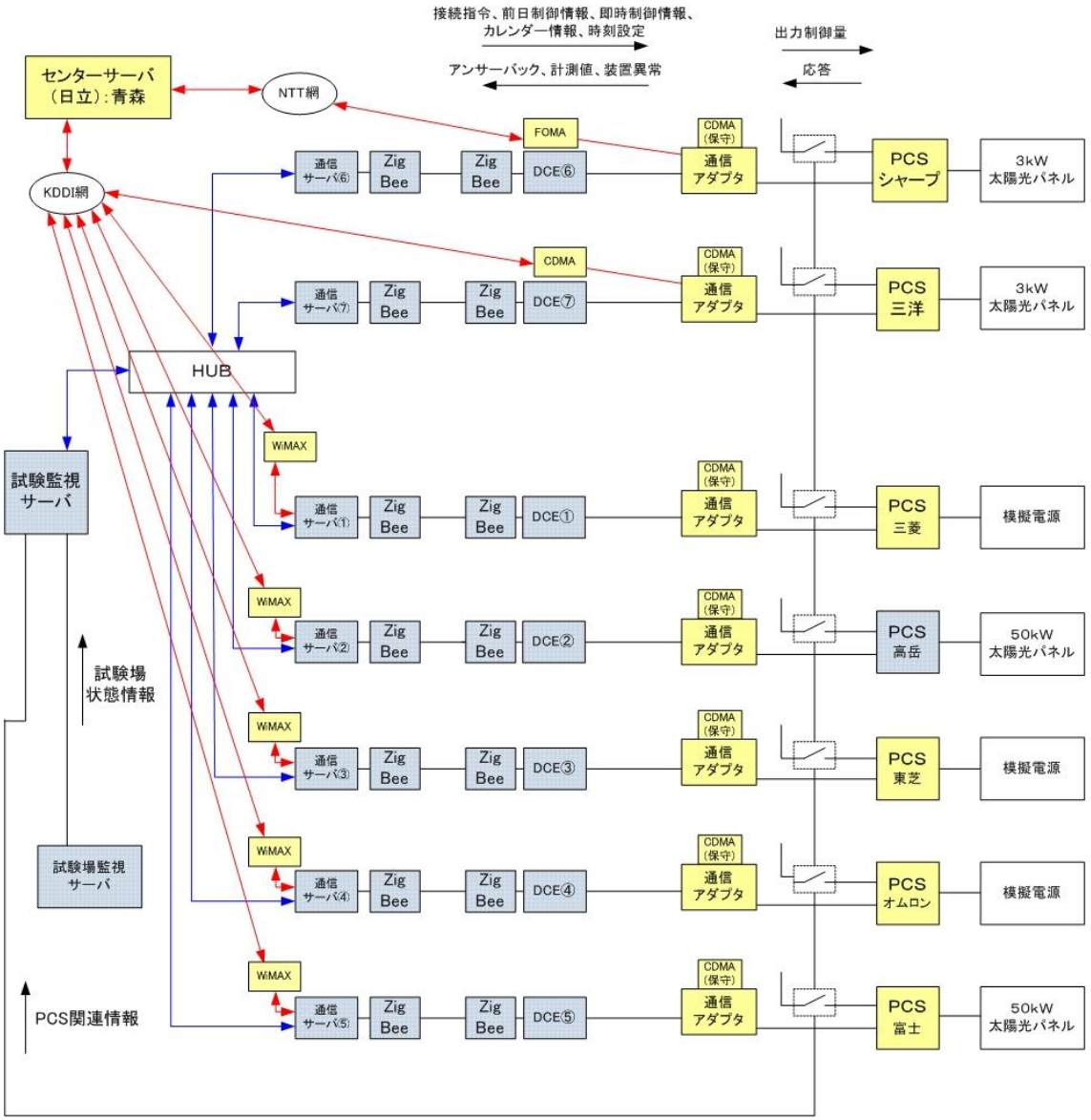


発電量／出力抑制量

シャープ製太陽光発電システム液晶画面例

4. 成果、目標の達成度

○高岳フィールドシステム構成図



(※)DCE(Data Circuit terminating Equipment)：データ回線終端装置

4. 成果、目標の達成度

○太陽光発電用PCSの開発

・評価指標：PCSの開発および通信信号により出力制御が可能であること

・結果：仕様に基づいたPCSの開発が完了し、通信アダプタとの試験により確実に出力制御が実現

	参加法人	開発機器	設置場所	試験結果
①	オムロン	PCS（住宅用）	高岳フィールド 青森フィールド	良
②	東芝	PCS（住宅用）	青森フィールド	良
③	三洋電機	PCS（住宅用）	高岳フィールド 青森フィールド	良
④	シャープ	PCS（住宅用）	高岳フィールド	良
⑤	三菱電機	PCS（住宅用）	高岳フィールド	良
⑥	高岳製作所	PCS（事業用）	高岳フィールド	良
⑦	日新電機	PCS（事業用）	関電工フィールド	良

4. 成果、目標の達成度

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
②通信による出力制御が可能な蓄電池用PCS	・通信機能付き蓄電池用PCSの開発 ・通信信号に応じて出力をコントロールできること	充・放電電力制御方法や主回路定格などの基本仕様ならびに通信機能仕様を検討し、それらを具備する機器開発を実施し、開発機器の動作試験および通信装置との接続試験を実施しており結果は良好である。今後は、実フィールドにおける試験および評価を実施し、事業終了時には完了する見込みである。	達成

4. 成果、目標の達成度

◎蓄電池用PCSの開発

○関電工

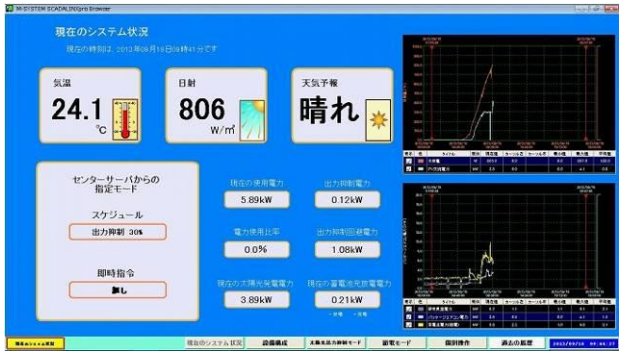
○基本仕様

機　器	仕　様	構　成
蓄電池用PCS	定格容量5kW	2台

蓄電池

蓄電池用PCS

蓄熱設備（給湯用HP）



中央監視システム

対象機器	試験項目	結果
蓄電池	定電流充放電試験	良
	定電力充放電試験	良
空調用HP	スケジュール運転試験	良
給湯用HP	スケジュール運転試験	良
負荷	照明制御試験	良
	空調制御試験	良

機能確認試験結果

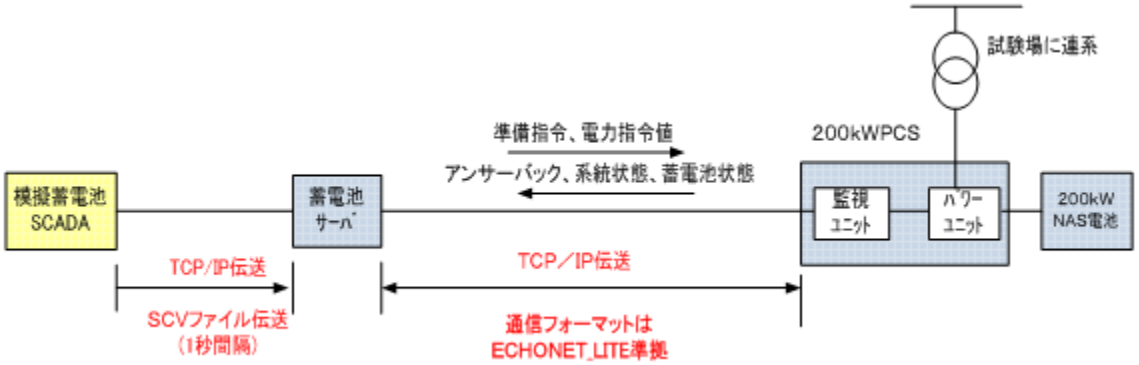
4. 成果、目標の達成度

○高岳製作所

○基本仕様

機器	仕様	構成
蓄電池用PCS	定格容量　200kW	50kW PCS4台並列運転

NAS電池用PCS



高岳フィールドシステム構成

○全体評価

・評価指標：PCSの開発および通信信号により出力制御が可能であること

・結果：仕様に基づいたPCSの開発が完了し、通信試験により確実に出力制御が実現

	参加法人	開発機器	設置場所	試験結果
①	関電工	蓄電池用PCS	関電工フィールド	良
②	高岳製作所	蓄電池用PCS	高岳フィールド	良

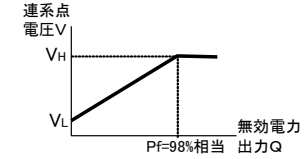
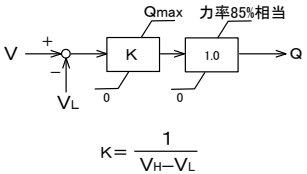
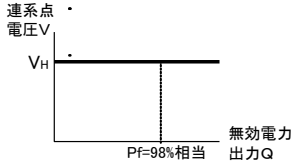
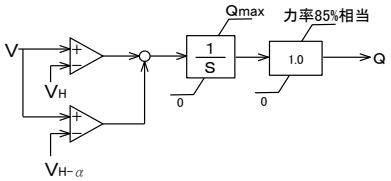
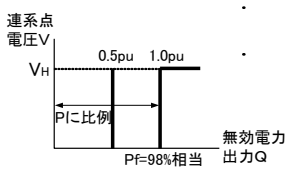
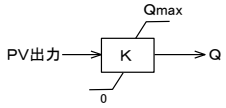
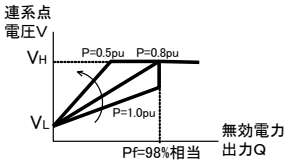
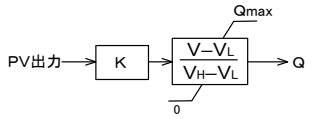
4. 成果、目標の達成度

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
③電圧調整機能付きPCS	・シミュレーション等の検討で選定された最適な制御方式を具備したPCSの開発 ・安定的に動作すること	各種シミュレーションを実施した上で、電圧上昇抑制効果やSVR（Step Voltage Regulator: 電圧調整器）タップ動作への影響、SVC（Static Var Compensator: 静止型無効電力補償装置）制御機能への影響、制御の安定性などを評価項目として、定力率制御方式、電圧依存型定力率制御方式を実証器に具備する制御方式として選定するとともに、基本制御仕様を検討・確定した。さらに前者を組み込んだ3kW級PCSおよび後者を組み込んだ50kW級PCSを製作し、工場試験を実施した。今後は、実フィールドにおける試験および評価を実施し、事業終了時には完了する見込みである。	達成

4. 成果、目標の達成度

◎電圧調整機能付きPCSの開発

○基本仕様

	電圧比例制御方式	電圧一定制御方式	定力率制御方式	電圧依存型定力率制御方式
動作特性・原理	 連系点電圧に比例して進み無効電力を出力する。  $K=\frac{1}{V_H-V_L}$	 連系点電圧が上限値を逸脱した場合には、上限値に低下するまで進み無効電力を増加出力させる 	 連系点電圧に関わらずPV出力に比例して進み無効電力を出力する  $K=\sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta}-1}$ $\cos\theta$ ＝ 設定力率>0.85	 PV出力に比例し、かつ連系点電圧に比例して進み無効電力を出力する  $K=\sqrt{\frac{1}{\cos^2\theta}-1}$ $\cos\theta$ ＝ 設定力率>0.85
逸失発電電力 （出力抑制量）	△	△	◎	◎
電圧上昇抑制効果	◎	△	◎	◎
タップ動作回数低減	◎	△	◎	◎
配電線損失	○	◎	△	○
LRTタップへの影響	△	△	◎	△
実証器に採用	―――	―――	○	○

4. 成果、目標の達成度

〇東芝

PCS

〇富士電機

PCS

〇評価

・評価指標：最適な制御方式の選定、PCSの開発および安定的な動作

・結果：最適な制御方式が選定完了、その方式を盛り込んだPCSの開発が完了し、試験により安定的に動作

	参加法人	開発機器	設置場所	試験結果
①	東芝	定力率制御方式PCS	高岳フィールド	良（工場試験）
②	富士電機	電圧依存型定力率制御方式PCS	高岳フィールド	良（工場試験）

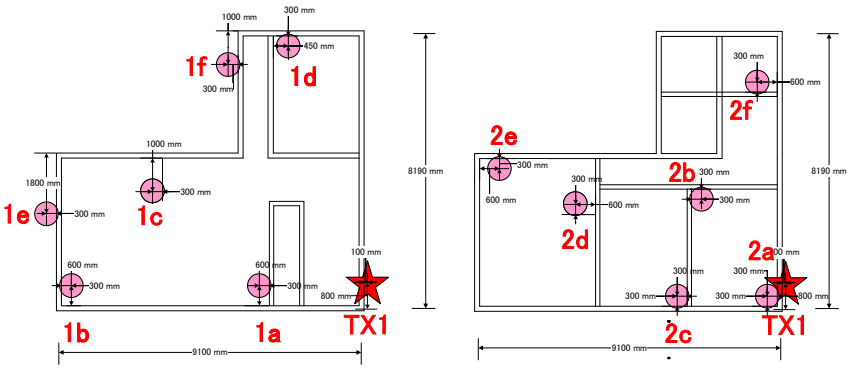
4. 成果、目標の達成度

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
④双方向通信機器	・PCSの出力制御を実現する種々の双方向通信機器の開発 ・安定的かつ確実に動作すること	センターサーバ～PCS間の構成、通信手順、電文形式等を議論のうえ取り纏め、PCSの制御を目的とした各種双方向通信において必要となる機器を開発した。また、開発した機器を実証フィールドおよび各社敷地内等において試験を実施した。現在、年間を通じたデータの取得や各種条件下における試験および評価を実施中であり、結果は良好である。事業終了時には全評価が完了する見込みである。	達成

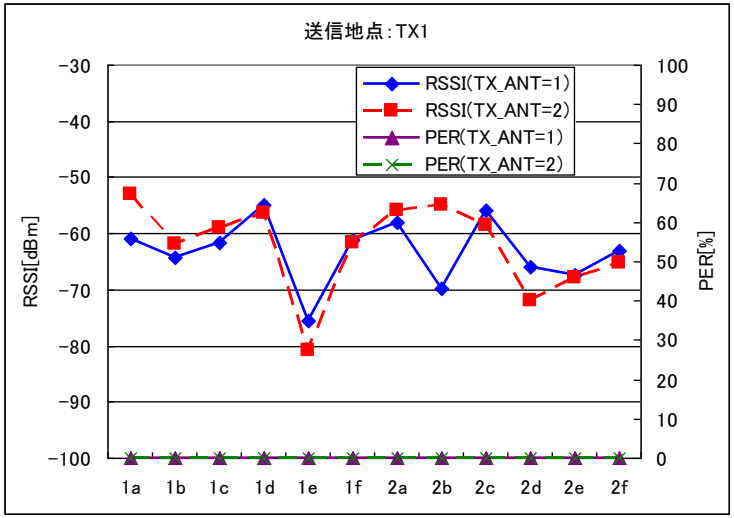
4. 成果、目標の達成度

○特定小電力無線・無線LAN

・900MHz帯の特小無線を実建物設備で評価（三菱電機）

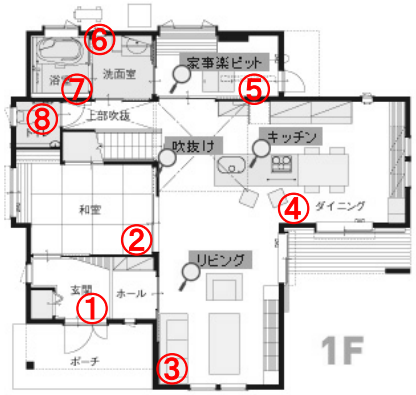


戸建て住宅の測定例

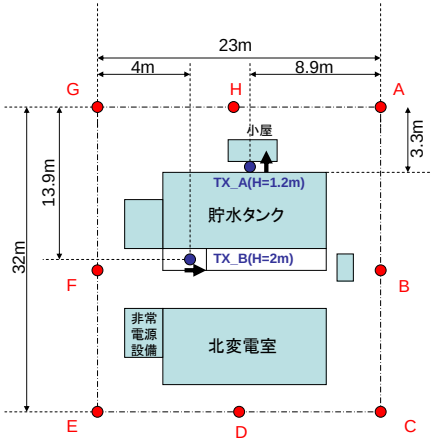


戸建て住宅の測定結果

・920MHz帯無線機および無線LAN伝送装置を実建物設備で評価（パナソニックシステムネットワークス）



宅内伝搬環境



屋外伝搬環境

・宅内では、920MHzのPERは0～0.1%、無線LAN（1MbpsでPER 0%、11MbpsでPER 0～0.82%）

・屋外伝搬では920MHzはPER 0～3%、無線LAN（1MbpsでPER0～95%、11Mbpsで0～100%）

・RSSI（Received Signal Strength Indication – 受信信号強度）：無線通信機器の受信信号の強度

・PER（Packet Error Rate – パケット誤り率）：伝送品質試験の一つ。送信パケットと受信パケットを比較し通信の品質を測定

4. 成果、目標の達成度

○特定小電力無線・無線LAN
・2.4GHz無線LANを実建物設備で評価（富士通）

双方向通信網 構成概要

評価サーバ、DCE、擬似PCSを開発し、無線LANマルチホップネットワークに組み込んで双方向通信出力制御の試験を行う。

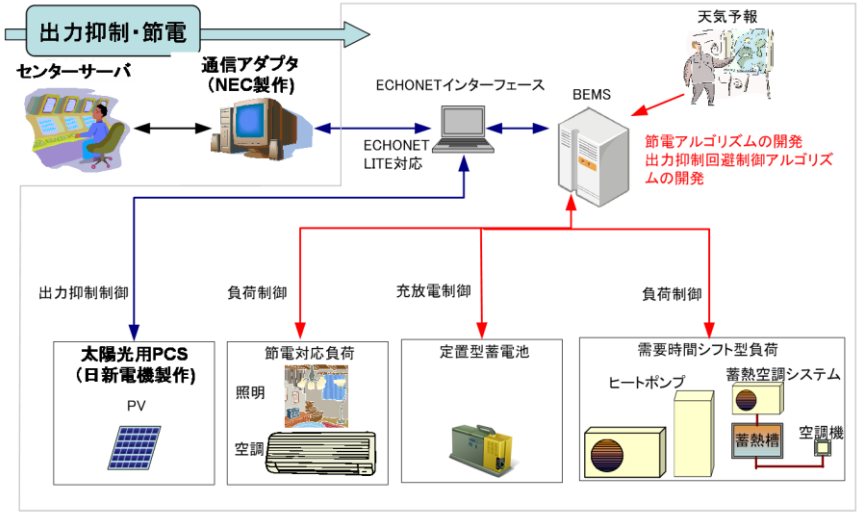
評価サーバ	双方向通信手段	擬似PCS、DCE
ECHONET Lite準拠のPCS制御情報送受信を行い、中央給電指令所を模擬する。	無線LANを使い、富士通アドホック方式で1,000台規模のマルチホップ通信ネットワークを構築し、双方向通信ネットワークを模擬する。	DCEにPCS制御情報の転送機能、PCに制御情報の送受信を行う機能を実装し、PCSを模擬する。

双方向通信網構成概要

4. 成果、目標の達成度

○PCS出力制御システム

・太陽光発電用PCSの出力制御を目的とした通信試験設備および制御システムを構築(関電工)



システム構成

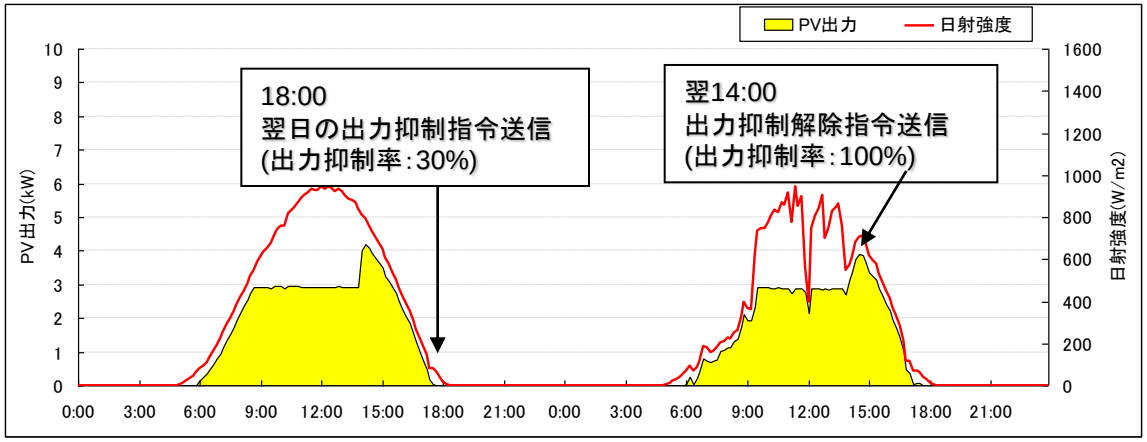
○カレンダ機能による出力抑制制御試験

・通信サーバシミュレータより出力抑制カレンダを送信し、BEMSを経由して出力抑制制御を行う。

・出力抑制スケジュールは共通試験(シナリオ2)に準ずる。

毎日18:00:翌日の出力抑制指令を送信(30%)

翌14:00:出力抑制を解除(100%)



出力制御試験

4. 成果、目標の達成度

○青森フィールド（青森県六ヶ所村）における機器設置箇所

4. 成果、目標の達成度

○実証シナリオ（青森フィールド）

＜出力制御方式＞

- **シナリオ1：カレンダ制御方式**
  - 必要に応じて当年と翌年の出力制御カレンダ（年間の特異日（30日程度）の出力制御情報）を設定
- **シナリオ2：翌日（当日）制御方式**
  - 毎日、翌日の出力制御の要否を判定し、必要であれば翌日の出力制御情報を設定

試験区分	H24	H25									
	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
シナリオ1	■			■			■			■		
シナリオ2		■			■			■			■	
個別試験			■			■			■			■

（左図）実証スケジュール

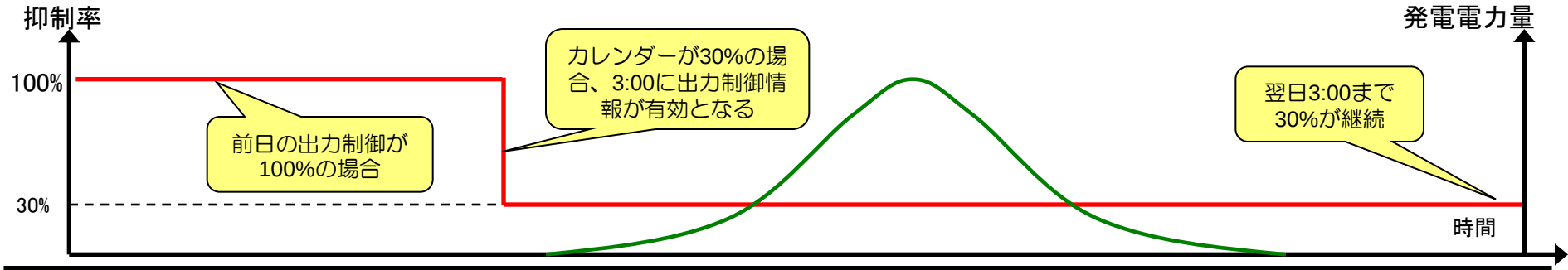
（下図）ユースケース

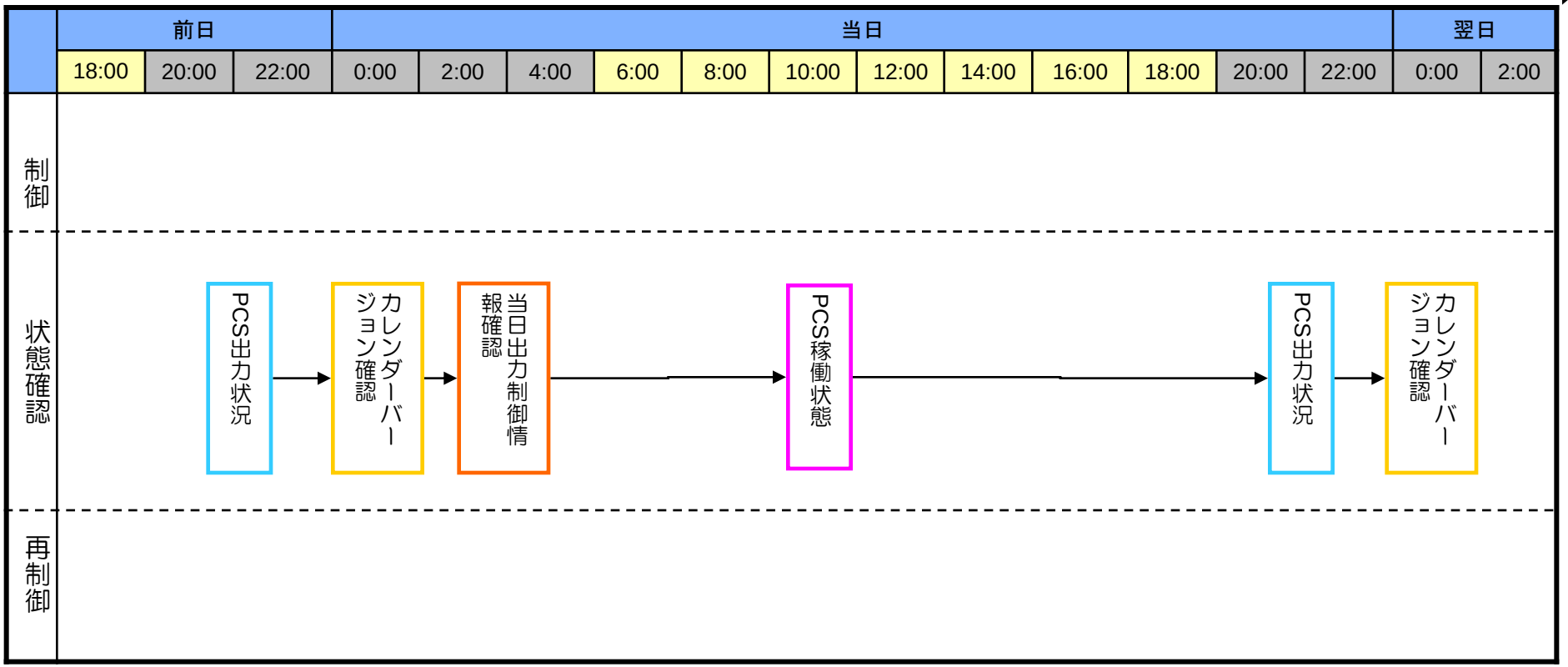
ユースケース	UCNo	実証試験項目	シナリオ1	シナリオ2
出力制御カレンダによるPCS出力制御	1	出力制御カレンダ情報の出力制御試験	●	―
出力制御カレンダバージョン設定値取得	2	出力制御カレンダバージョン設定値の取得試験	●	―
翌日（当日）出力制御情報によるPCS出力制御	3-1	翌日出力制御情報の出力試験	―	●
	3-2	当日出力解除情報の出力試験	―	●
	3-3	当日出力制御情報の出力試験	―	●
翌日（当日）出力制御情報設定値取得	4-1	翌日出力制御情報設定値の取得試験	―	●
	4-2	当日出力制御情報設定値の取得試験	●	●
PCS登録管理	5	PCS登録管理試験	―	―
PCS出力状況監視	6-1	PCS出力状況（当日最大値）情報の取得試験	●	●
	6-2	PCS出力状況情報の取得試験	●	●
PCS稼動状態監視	7-1	PCS稼動状態の取得試験	●	●
	7-2	PCSエラーコードの取得試験	●	●
	7-3	PCS現在日時の取得試験	●	●
PCS時刻同期	8	PCS時刻同期試験	●	●

4. 成果、目標の達成度

＜シナリオ1＞カレンダー制御方式（通常時）

- あらかじめ送信したカレンダーの制御情報に基づき出力制御

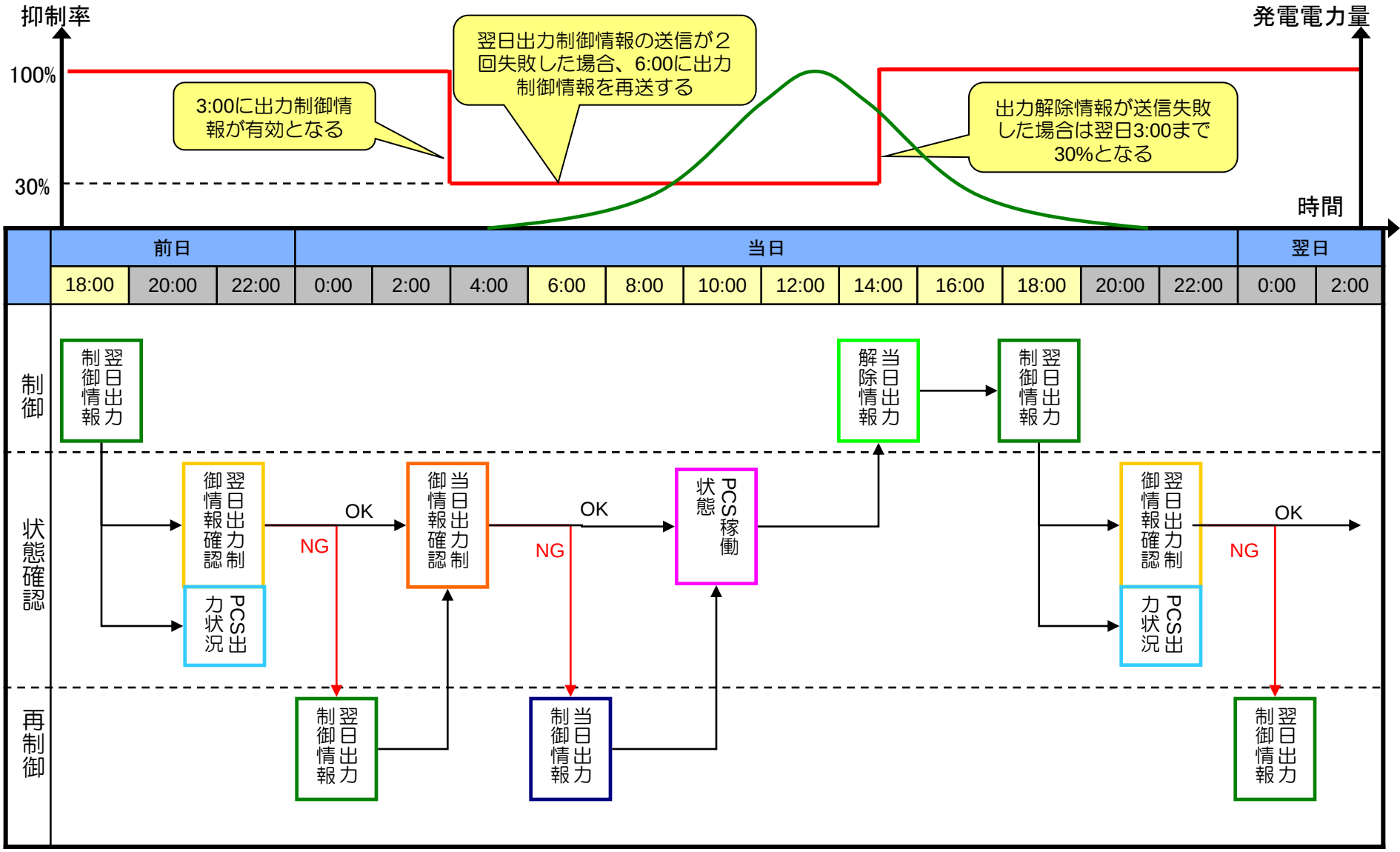




4. 成果、目標の達成度

＜シナリオ2＞翌日出力制御方式

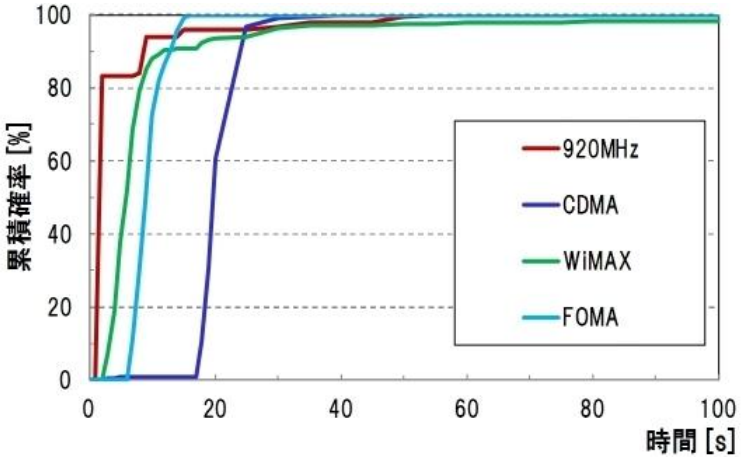
- 前日に設定した制御情報に基づき出力制御



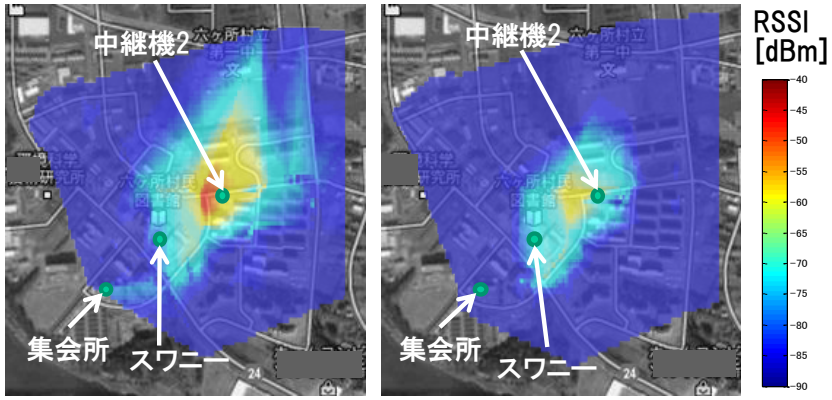
4. 成果、目標の達成度

○試験用無線端末センターサーバーの開発（日立製作所）

センターサーバー（制御信号を伝送する装置）



応答速度比較



①429MHz　②920MHz

電波伝搬特性

4. 成果、目標の達成度

○通信アダプタの開発（日本電気）

ECHONET Liteをベースとした通信フレーム構成

区間	局内/局間	ＷＡＮ通信手順			アダプタ	PCS通信手順	
出力制御手順	WAN側通信手順 （専用ヘッダ+ECHONET Lite 電文形式）				制御手順の終端機能	PCS通信手順 （PCS-アダプタ共通手順）	
トランスポート層以下	サーバ間通信	WAN	DCE通信媒体		ネットワーク終端機能	PCS通信媒体	
	IP	独自	調歩同期	IP		UDP/IP	調歩同期
	Local接続 広域網など	WAN通信メディア	RS-485	Ethernet		Ethernet	RS-485

通信アダプタにおけるプロトコルスタックとシステム構成

通信アダプタ装置（試作機）

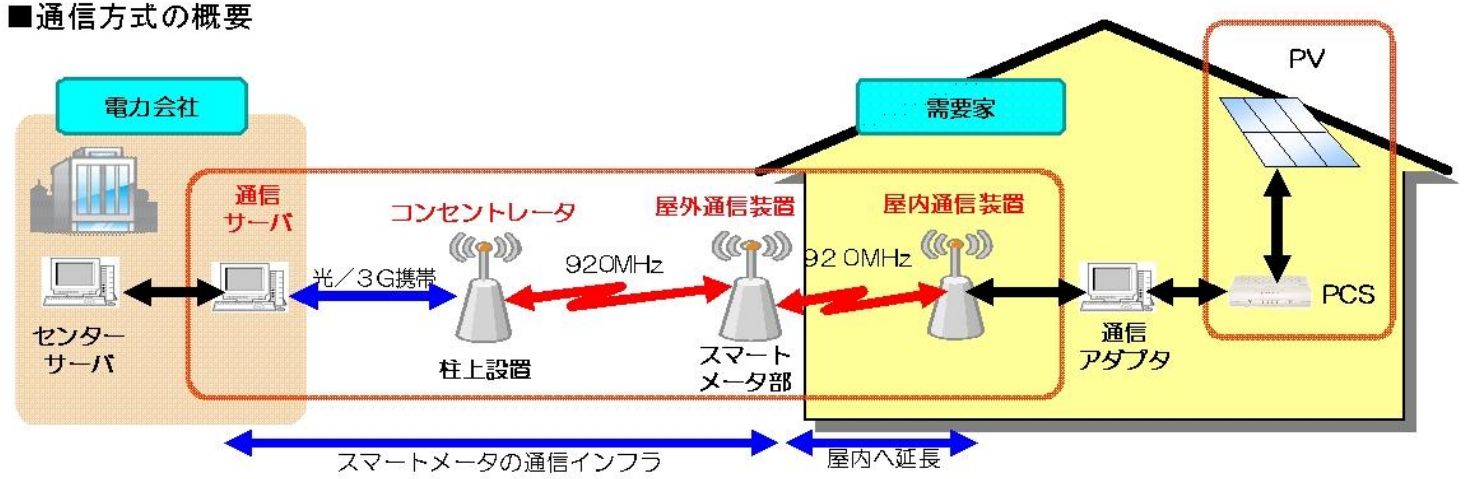
電気設備室への設置事例

4. 成果、目標の達成度

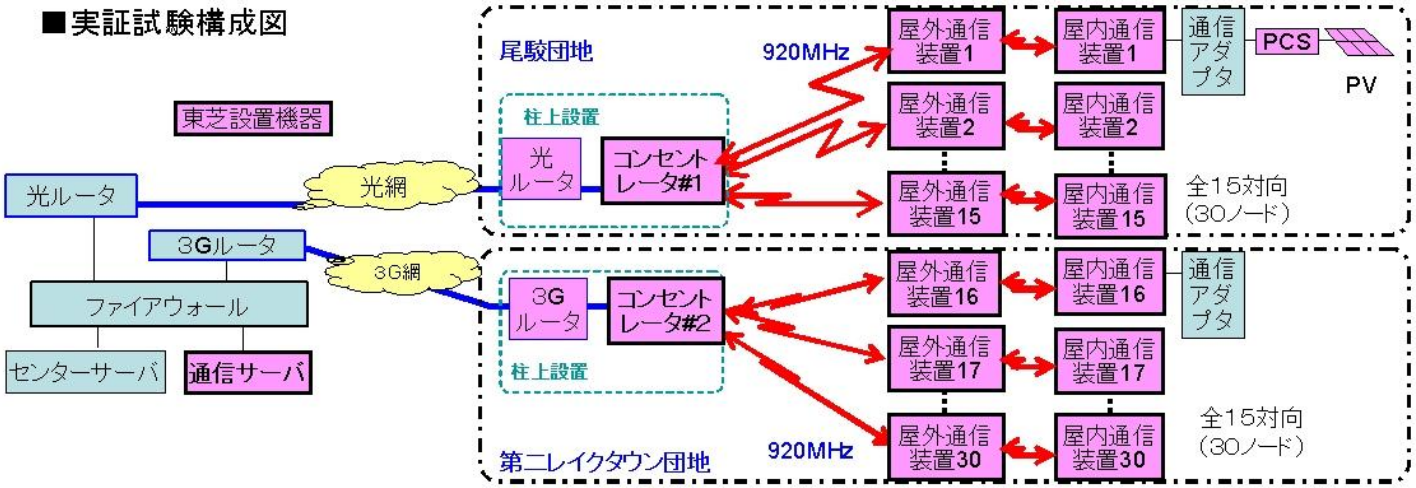
○特定小電力無線・無線LAN

- 900MHz帯の特小無線を青森で評価（東芝）

■通信方式の概要



■実証試験構成図

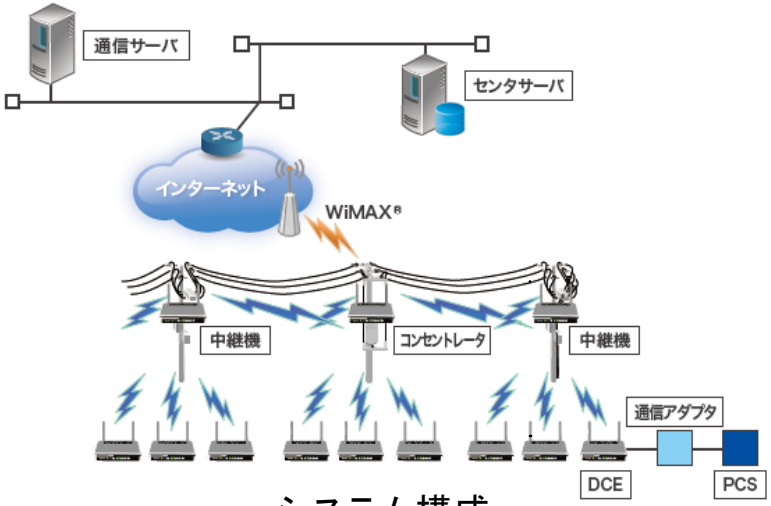


システム構成図

4. 成果、目標の達成度

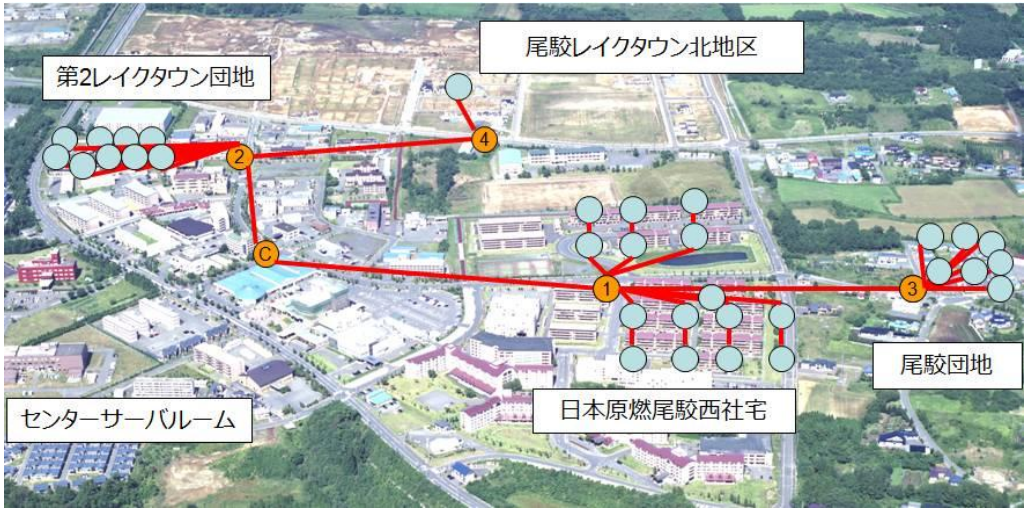
○特定小電力無線・無線LAN

- 900MHz帯の特小無線を青森で評価（沖電気工業）



システム構成

無線機



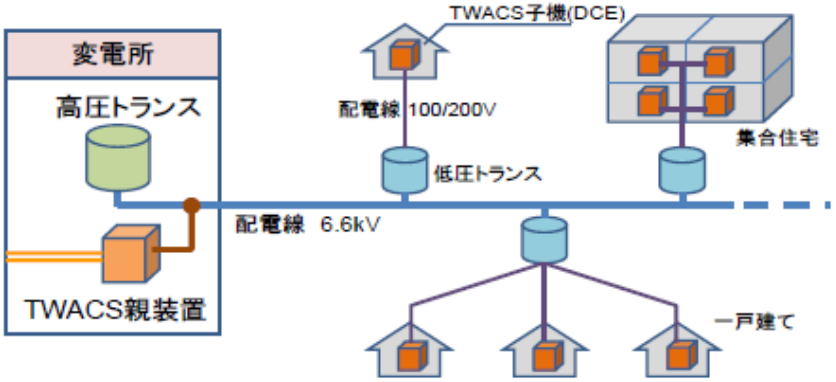
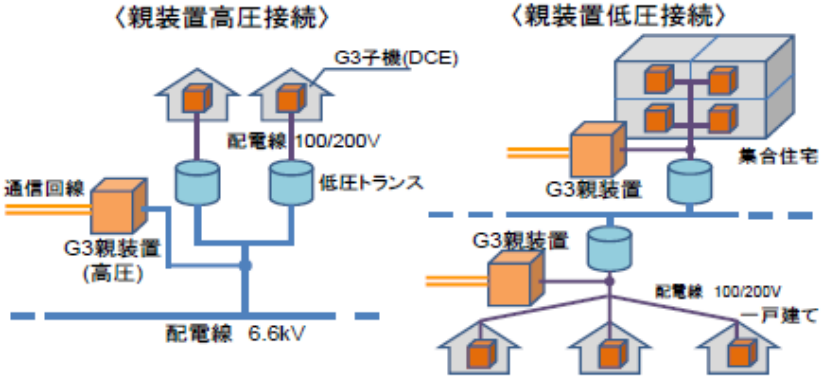
青森フィールドにおける機器の設置状況

青：DCE
橙：コンセントレータ、中継器
赤：転送経路の一例

4. 成果、目標の達成度

○電力線搬送（PLC）

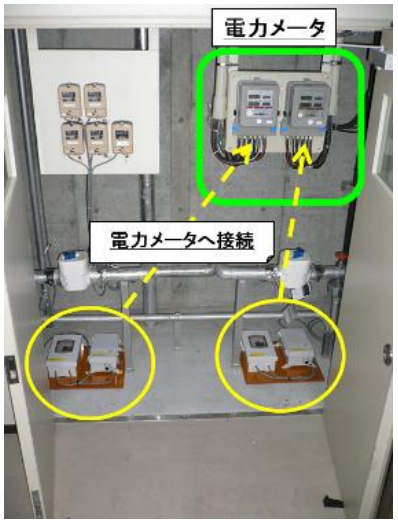
・TWACS、G3について青森で評価（住友電気工業）

TWACS方式	G3方式
・**電力会社の変電所**に親装置を設置 ・変電所配下に接続した需要家との通信を確立	・**低圧トランス**付近に親装置を設置 ・トランス配下に接続した需要家との通信を確立
	
①超長距離通信　伝送距離100km以上（無中継） ②大規模システム　変電所配下の子機を全て接続 ③通信安定性　ノイズ外乱に強く、トランス越え可能	①通信速度　数十～100kbps程度 ②スター型トポロジ　集合住宅への高い適用性 ③オープンな規格　国際標準（通信仕様は一般公開）

4. 成果、目標の達成度

○電力線搬送(PLC)

TWACS方式PLC親装置



PLC子装置

G3方式PLC親装置

PLC方式	月	PCS制御シナリオ	PLC区間の通信成功率[%]
TWACS方式	12	シナリオ１	100.0
	1	シナリオ２	99.98
	3	シナリオ１	99.85
	4	シナリオ２	100.0
	6	シナリオ１	99.95
	7	シナリオ２	100.0
G3方式	12	シナリオ１	100.0
	1	シナリオ２	99.98
	3	シナリオ１	99.87
	4	シナリオ２	99.92
	6	シナリオ１	99.87
	7	シナリオ２	99.95

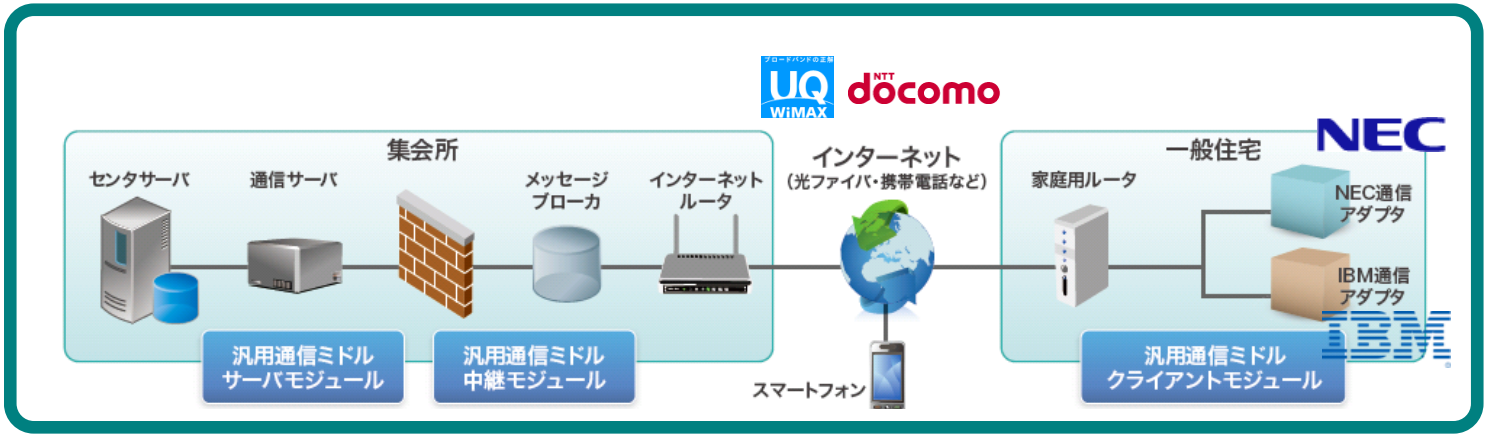
4. 成果、目標の達成度

○インターネットで動作する汎用通信ソフトの開発（日本アイ・ビー・エム）

・今後大量に導入・接続されるPCSとの相互接続性・対障害性・保守性を向上させることを目的として、双方向通信による出力制御の実現に必要な、個別送信・同報送信、送達確認、再送制御、セキュリティ（暗号化・認証）などの処理を共通化する通信ソフトウェアを開発

・青森フィールドに、WiMAXとFOMAによるインターネット環境を構築し、信頼性・性能・障害回復などの観点での出力制御の実証試験を継続中

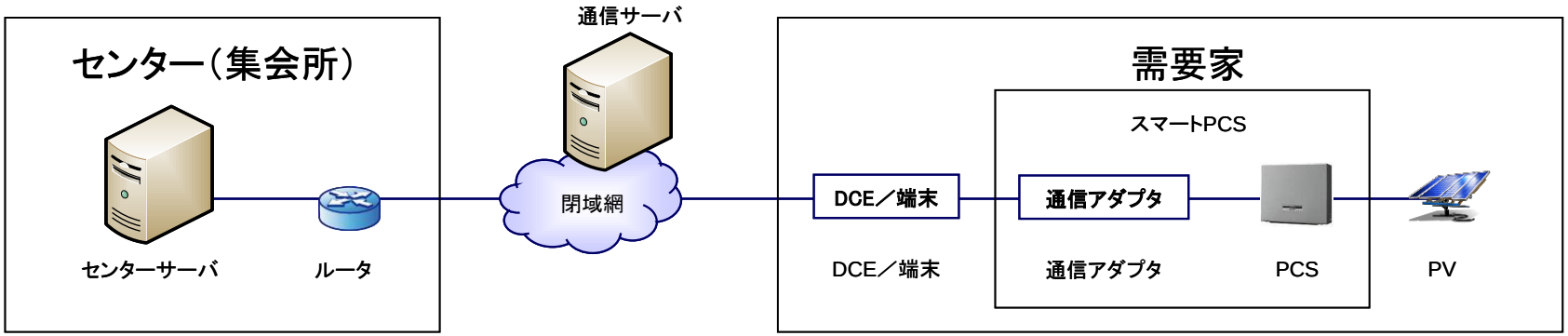
・実証状況としては、電文の通信成功率100%、応答時間は1秒台と十分な信頼性と性能が確保



システム構成

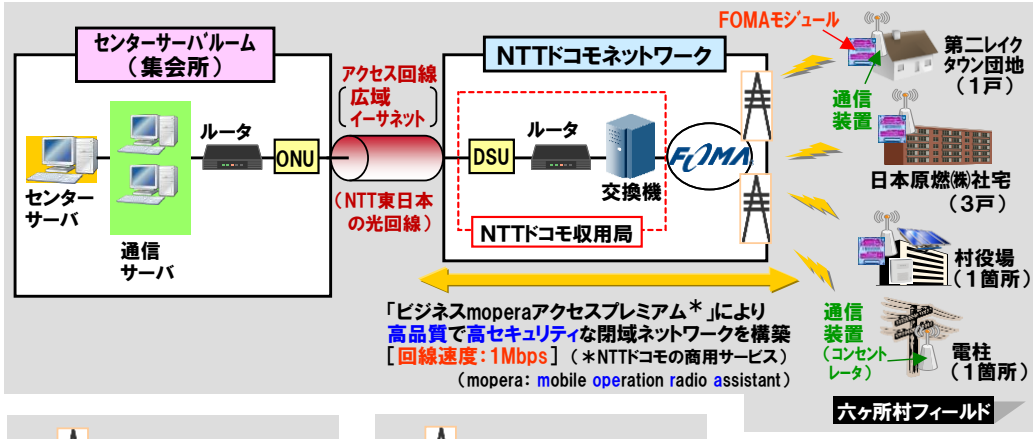
4. 成果、目標の達成度

○公衆無線網（KDDI）（青森）



システム構成図

○公衆無線網（NTTドコモ）（青森）



FOMAの通信試験回線数

六ヶ所村フィールド	6回線
栃木フィールド	1回線
茨城フィールド	1回線
合　計	8回線

システム構成

建物	FOMA端末設置場所	RSCP＊値（dBm）	干渉電力比（dB）	判定
第二レイクタウン団地	トイレ内上部棚	-103（窓付近：-99）	-10（窓付近：-8）	弱電界（窓付近：強電界）
日本原燃（株）西社宅C棟	玄関付近	-94～-89	-11～-10	強電界～弱電界
日本原燃（株）西社宅2号棟	リビングルーム窓側の床	-93（窓付近：-89）	-9（窓付近：-8）	弱電界（窓付近：強電界）
日本原燃（株）西社宅10号棟	台所の床上	-99～-96	-10～-8	強電界～弱電界
村役場第二分庁舎	2階廊下に設置した棚	-82～-80	-7～-6	強電界

判　定	内　容
強電界	パケット通信可能
弱電界	パケット通信可能＊
圏　外	パケット通信不可

（＊IP着信からパケット通信開始まで時間がかかる場合あり。）

RSCP: Received Signal Code Power

（受信信号コードパワー）

電波調査結果

4. 成果、目標の達成度

○評価

・評価指標：通信機器の開発、開発機器の安定的かつ確実な動作

・結果：通信機器の開発が完了し、パケットエラー率（PER）や通信成功率の評価により良好な結果を取得

	法人	開発機器	設置場所	試験結果
①	三菱電機	900MHz帯特小無線	自社フィールド	良
②	パナソニック システムネットワークス	900MHz帯特小無線 2.4GHz帯無線LAN	自社フィールド	良
③	富士通	2.4GHz帯無線LAN	自社フィールド	良
④	関電工	PCS出力制御システム	関電工フィールド	良
⑤	日立製作所	試験用無線端末 センターサーバ	青森フィールド	良
⑥	東芝	900MHz帯特小無線	青森フィールド	良
⑦	沖電気工業	900MHz帯特小無線	青森フィールド	良
⑧	住友電気工業	電力線通信（PLC）	青森フィールド 高岳フィールド	良
⑨	日本電気	通信アダプタ	青森フィールド 関電工フィールド 高岳フィールド	良
⑩	日本アイー・ビー・エム	汎用通信ソフトウェア	青森フィールド	良
⑪	ＫＤＤＩ	広域サービス網を利用した 通信ネットワーク（公衆無線網）	青森フィールド 関電工フィールド 高岳フィールド	良
⑫	ＮＴＴドコモ	広域サービス網を利用した 通信ネットワーク（公衆無線網）	青森フィールド 関電工フィールド 高岳フィールド	良

4. 成果、目標の達成度

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
⑤サイバーセキュリティ関連機器	・通信ネットワークに内在する脆弱性の検討・セキュリティ技術の開発 ・想定される攻撃からネットワークを保護できること	スマートグリッドシステムのセキュリティに関わる文献調査などにより、セキュリティリスクに対する対策方針について検討を行った。また、開発した侵入検知システムを青森フィールドに導入し、作成した対策方針を参考に、複数の検知方法で評価を実施し、その結果より検知率の向上方策を検討した。今後はシステムの試験を引き続き実施し、事業終了時には評価を完了する見込みである。	達成

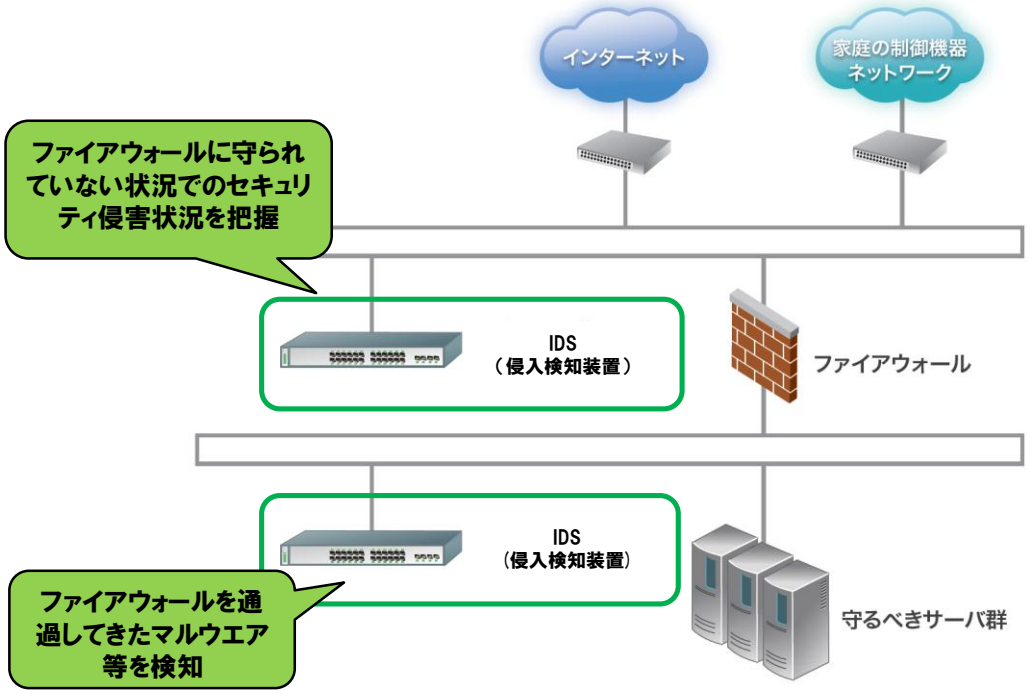
4. 成果、目標の達成度

◎サイバーセキュリティ関連機器の開発

○対策方針（一部抜粋）

UC	UC概要	機能	保有情報	通信パターン（双方向、サーバからのみ、スマートPCSからのみ）	想定保有期間（短期(1,2日程度)/長期/未定）	脅威	脅威類型 A（可用性）	脅威類型 I（完全性）	脅威類型 C（機密性）	脆弱性	発生原因種別	発生可能性	発生可能性の根拠	影響度	影響度 理由	リスク値(発生可能性と影響度から導出)	対策方針 技術	対策方針 物理	対策方針 運用
UC1	出力制御カレンダによるPCS出力制御	・通信サーバから出力制御カレンダ更新要求の受付	・出力制御カレンダ更新情報（通信アダプタID、電力会社ID、出力制御カレンダ情報）	双方向	長期	出力制御カレンダ更新情報受信不能	○	－	－	スマートPCSに接続されているケーブルが抜かれる	故意	並		小	【影響対象】個別PCSにとどまり、系統側への影響は軽微。 【影響内容】適切な制御情報が受け取れず、制御値通りの発電が行われなくなる。	2			
							○	－	－	物理的にスマートPCSが破壊される	故意	並				2			
							○	－	－	物理的にスマートPCSが破壊される	環境	低				1			
							○	－	－	論理的（DOS攻撃等を想定）にスマートPCSが破壊される	故意	高				3	1 2 3 4	－	1
		・出力制御カレンダの更新	・出力制御カレンダ更新情報（通信アダプタID、電力会社ID、出力制御カレンダ情報） ・当日出力制御情報			出力制御カレンダ更新不能	○	－	－	物理的にスマートPCSが破壊される	故意	並		小	【影響対象】個別PCSにとどまり、系統側への影響は軽微。 【影響内容】適切な制御情報へ更新できず、制御値通りの発電が行われなくなる。	2			
							○	－	－	物理的にスマートPCSが破壊される	環境	低				1			
							○	－	－	論理的（DOS攻撃等を想定）にスマートPCSが破壊される	故意	高				3	1 2 3 4	－	1

4. 成果、目標の達成度



青森フィールドにおけるシステム構成図

○評価

・評価指標：脆弱性の洗い出し、およびセキュリティ技術の開発。想定される攻撃から保護できること。

・結果：セキュリティ対策方針の検討および青森フィールドでのセキュリティ対策の明確化とIDSの検知率の向上方策を検討

	参加法人	開発機器	設置場所	達成度
①	NRIセキュアテクノロジーズ	セキュリティリスク評価・診断 攻撃検知／防御システム	青森フィールド	達成

4. 成果、目標の達成度

○論文、投稿、発表、特許リスト

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	国際標準への寄与
①通信による出力制御が可能な太陽光PCS（住宅用、事業用）	0	0	0	0
②通信による出力制御が可能な蓄電池用PCS	0	0	0	0
③電圧調整機能付きPCS	0	0	0	0
④双方向通信機器	3	0	0	0
⑤サイバーセキュリティ関連機器	0	0	0	0
全般	3	0	0	0
計	6	0	0	0

５．事業化、波及効果

○事業化の見通し

太陽光の発電出力を制御できる通信機能付き太陽光発電用PCS、通信機能付き蓄電池用PCS、PCSの出力制御を実現する種々の双方向通信機器、および各PCSの通信機能としての各通信メディアについては、事業化に対し十分な技術的成果が得られた。今後の事業化の前提として、現在検討が進められている電力自由化後の電力系統の姿も見据えながら、太陽光発電の双方向通信による出力制御の必要性について、広く関係者と議論を進めていくことが必要である。併せて、誰が太陽光発電の出力制御を主体となって行うのか、設置したPCSをどのような方法で登録するのかなど、制度面からの設計も平行して検討を進めていく必要がある。また、既に普及している太陽光発電設備も出力制御の対象とするのか、もし対象とするならば、どのような方式で行うのかなどについても検討する必要がある。

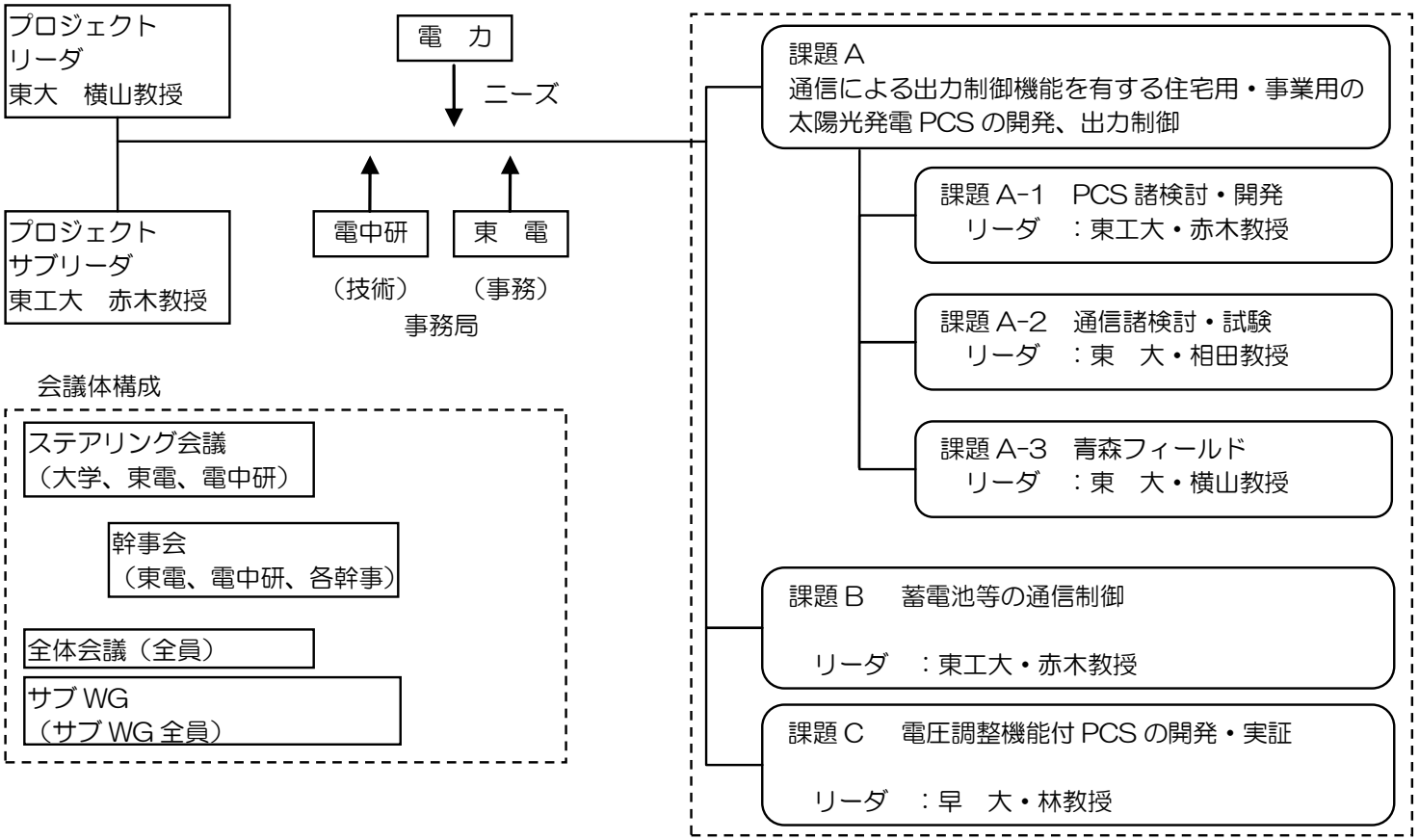
○波及効果

成果の高度化等に関する波及効果の事例として、以下の分野への応用が考えられる。

- 太陽光発電用PCSの風力等他の分散電源用PCSへの応用
- 系統用蓄電池用PCSの家庭用蓄電池用PCSへの応用
- 電圧調整機能付きPCSの制御方式の検討ノウハウの配電制御高度化への応用
- PCS制御用双方向通信方式の他のセンサーネットワーク（スマートメータ、デマンドレスポンスなど）への応用

6. 研究開発マネジメント・体制等

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、国立大学法人東京大学他33法人が経済産業省からの委託を受けて実施した。研究開発の実施に当たっては、プロジェクトリーダ（東京大学横山教授）、プロジェクトサブリーダ（東京工業大学　赤木教授）、事務局（東京電力、電力中央研究所）を設置するとともに、効率的な本研究開発の遂行のため、実施事項毎にSWGを組織し推進した。全体の進捗確認、各SWGへのフィードバック、SWG間の連携などの全体運営は、全体会議、ステアリング会議、幹事会を設置し、随時開催して推進した。



6. 研究開発マネジメント・体制等

○要素技術と課題の関係

課題 / 要素技術	A-1	A-2	A-3	B	C	法人名
①通信による出力制御が可能な太陽光PCS(住宅用、事業用)	○		○			オムロン、東芝、三洋電機、シャープ、三菱電機、高岳製作所、日新電機、富士電機
②通信による出力制御が可能な蓄電池用PCS			○	○		関電工、高岳製作所
③電圧調整機能付きPCS			○		○	東芝、富士電機
④双方向通信機器		○	○			KDDI、NTTドコモ、三菱電機、パナソニックシステムネットワークス、富士通、日本電気、日立製作所、東芝、沖電気工業、住友電気工業、日本アイ・ビー・エム
⑤サイバーセキュリティ関連機器		○	○			NRIセキュアテクノロジーズ

7. 事前評価の結果

平成22年7月、産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会委員からの時点でのコメントに対する対処方針

コメント	対処方針
○ 双方向通信制御の重要性は理解。ただし、ロードマップを見ると展開がゆっくりしているので世界的な動向も見極めつつもっと早く進めるべき。	○ 関連する他の実証事業の進捗や、我が国の電力系統や再生可能エネルギーの導入状況等を踏まえつつ、電力の安定供給を前提に、双方向通信制御技術の早期確立を推進していく。
○ メガソーラー、ウィンドファームは制御が不可避であり、電力会社が納得するレベルに技術を作り込んでいく必要があるため、電力会社と一体となった開発が不可欠。	○ 本事業においては、通信事業者やメーカーの他、電気事業者等も参加し、電力の安定供給が確保される等、電気事業者の要求水準に見合う技術開発を行っていく予定。 また、先発の次世代送配電系統最適制御技術実証事業、太陽光発電出力予測技術開発実証事業及び次世代型双方向通信出力制御実証事業はそれぞれ関連性もあることから、連携して一体的に推進していく。

太陽光発電出力予測技術開発実証事業の概要について

平成25年11月13日

電力・ガス事業部　電力基盤整備課

補助事業者17法人

目　次

１．プロジェクトの概要

２．目的・政策的位置付け

３．目標

４．成果、目標の達成度

５．事業化、波及効果

６．研究開発マネジメント・体制等

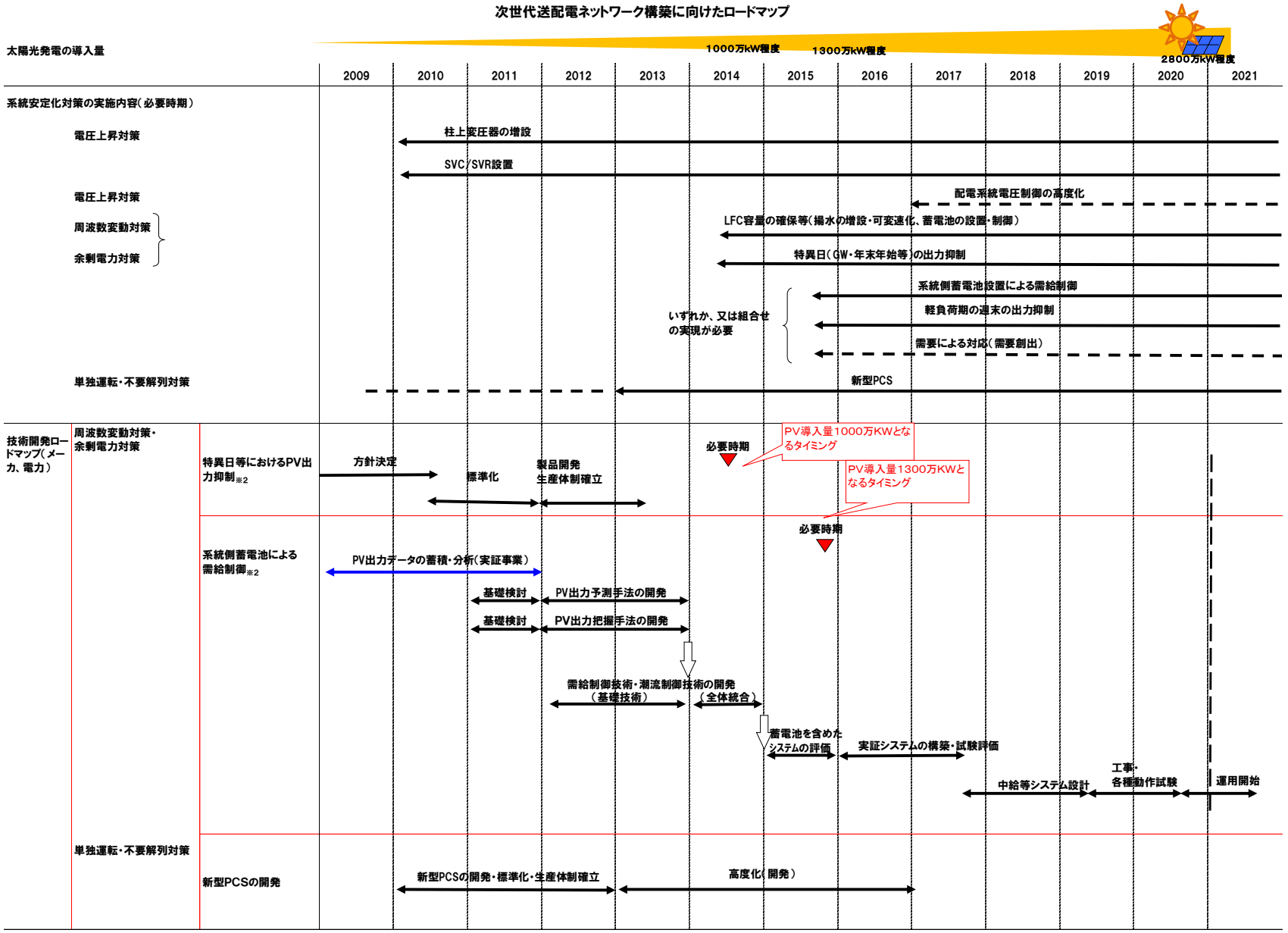
７．事前評価結果

1. 太陽光発電出力予測技術開発実証事業の概要

概　　要	太陽光発電大量導入時に必須となる、太陽光発電の出力状況把握や出力予測のための技術開発を行う。
実施期間	平成23 年度～平成25 年度　（3年間）
予算総額	2.2億円 （補助率1/2）
実 施 者	東京大学、伊藤忠テクノソリューションズ、ソーラーフロンティア、日本気象協会、日立製作所、三菱電機、電力中央研究所、電力10社
プロジェクトリーダー	荻本　和彦　　東京大学　特任教授

年度（平成）	23	24	25
予算（億円）	1.0	0．9	0．3

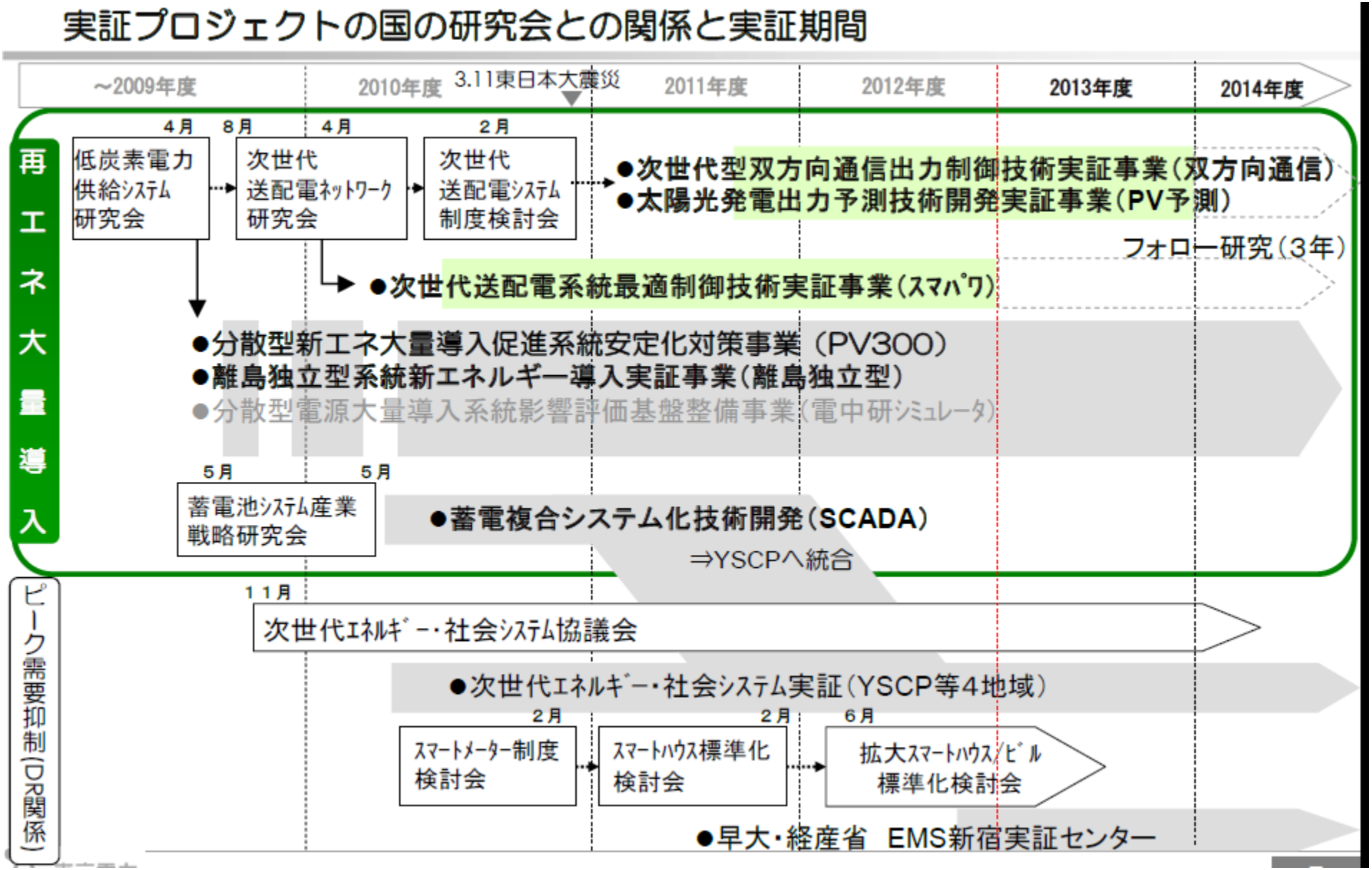
2. プロジェクトの目的・政策的位置付け



※ 次世代送配電ネットワーク研究会報告書（平成22年4月）より抜粋

2. プロジェクトの目的・政策的位置付け

実証プロジェクトの国の研究会との関係と実証期間



2. プロジェクトの目的・政策的位置付け

～次世代送配電制御,次世代双方向通信,PV出力予測の実証体制～

次世代配電制御方式
早大,富士電機,明電舎

次世代配電制御機器開発
東工大,日立,TMEIC,電中研

需給制御技術・PV余剰対策評価
東大,東芝,三菱電機,日立,
伊藤忠商事,伊藤忠ﾃｸﾉｿﾘｭｰｼｮﾝｽﾞ

通信標準化調査,ｾｷｭﾘﾃｨ検討
電中研,NRIｾｷｭｱﾃｸﾉﾛｼﾞｰｽﾞ

需要制御技術・宅内機器制御
東大,東芝,日立,三菱電機,ｼｬｰﾌﾟ,
ﾀﾞｲｷﾝ,NEC,ﾊﾟﾅｿﾆｯｸSSJ,
三菱自動車,関電工,電中研

次世代送配電系統最適制御技術実証
（28法人）

各種双方向通信方式を用いた実証試験
東大,日立,東芝, NEC,
ﾊﾟﾅｿﾆｯｸSSｲﾝﾌﾗｼｽﾃﾑ,
富士通,三菱電機,沖電気,
KDDI,NTTDOCOMO,
住友電工,日本IBM,
NRIｾｷｭｱﾃｸﾉﾛｼﾞｰｽﾞ,
高岳製作所,関電工,(青森県)

各電力会社

日射強度把握・予測技術
日本気象協会,電中研,
伊藤忠ﾃｸﾉｿﾘｭｰｼｮﾝｽﾞ

PV出力推定技術
日立,三菱電機,
ｿｰﾗｰﾌﾛﾝﾃｨｱ,電中研,
伊藤忠ﾃｸﾉｿﾘｭｰｼｮﾝｽﾞ

日射分析
東大

太陽光発電出力予測技術開発実証
（17法人）

双方向通信機能や電圧調整機能付きPCS開発
早大,東工大,ｼｬｰﾌﾟ,ｵﾑﾛﾝ,東芝,三菱電機,三洋電機,日新電機,富士電機,
高岳製作所,関電工

次世代型双方向通信出力制御実証
（33法人）

全参加法人：42法人

◆大学,研究機関等
東大,東工大,早大,電中研,
日本気象協会

◆メーカー等
日本IBM,伊藤忠商事,
伊藤忠ﾃｸﾉｿﾘｭｰｼｮﾝｽﾞ,NEC,
NRIｾｷｭｱﾃｸﾉﾛｼﾞｰｽﾞ,NTTDOCOMO,
沖電気,ｵﾑﾛﾝ,関電工, KDDI,三洋電機,ｼｬｰﾌﾟ,住友電工,ｿｰﾗｰﾌﾛﾝﾃｨｱ,ﾀﾞｲｷﾝ,
高岳製作所, TMEIC,東芝,
日新電機,ﾊﾟﾅｿﾆｯｸSSJ,ﾊﾟﾅｿﾆｯｸSSｲﾝﾌﾗｼｽﾃﾑ,日立,富士通,富士電機,
三菱自動車,三菱電機, 明電舎,

◆電力会社
北海道,東北,東京,中部,関西,北陸,
中国,四国,九州,沖縄

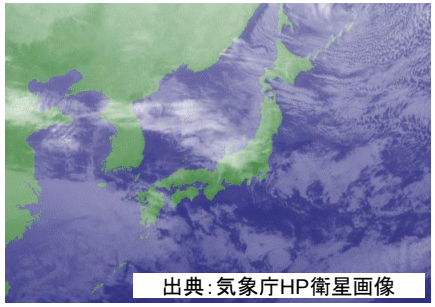
3. 目標

～太陽光発電出力予測技術開発実証～

目的 太陽光発電大量導入時の安定的な需給運用のため、太陽光発電出力の現在把握と事前予測を行う技術を確立する

気象データや日射量計データ等から現在の太陽光発電出力を把握する手法の開発と、気象予報技術を応用した事前に太陽光発電出力を予測する手法の開発

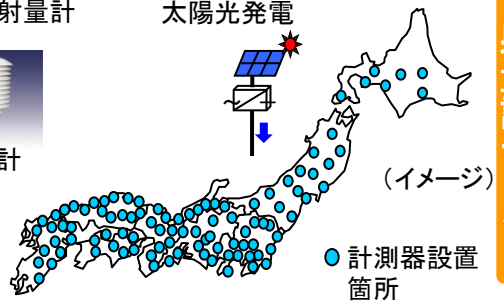
■太陽光発電出力の把握・予測と需給運用の関連 <概念図>



気象データ

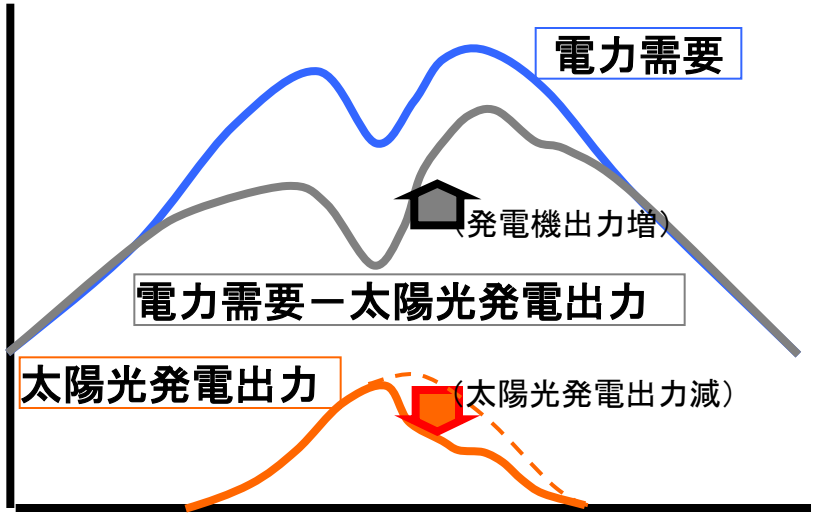
全天日射量計

気温計



日射量計データ

太陽光発電出力把握・予測



3. 目標

(1)事業内容

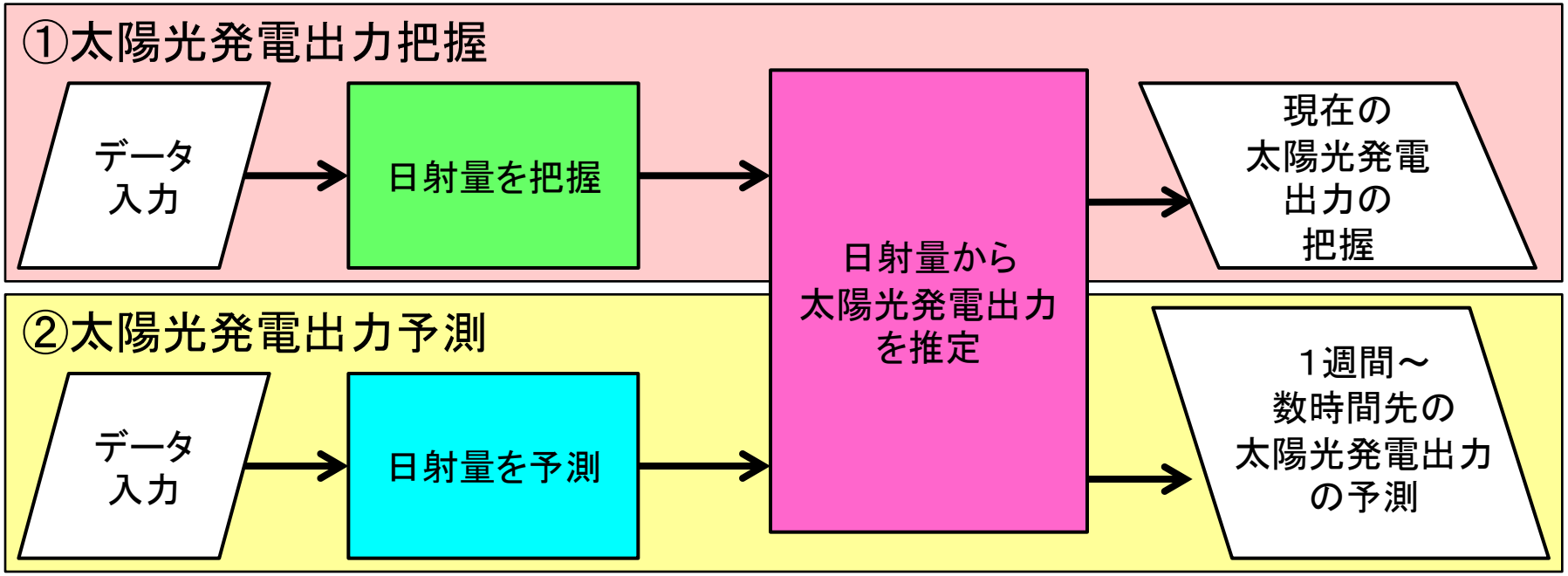
①太陽光発電出力把握手法の開発 ⇒ 現在出力の把握

②太陽光発電出力予測技術の開発 ⇒ 1週間～数時間先を予測

(2)技術的アプローチ

・天気予報の技術を応用し日射量の推定，予測を行うための技術を開発

・誤差要因を考慮し、日射量からPV出力を推定する技術開発



3. 目標

(3)要素技術と担当法人

日射量の把握	課題⑧－1	JWA	日射量観測データや気象衛星データからの日射量推定
	課題⑧－2	電中研	空間線形回帰法(クリギング)に基づく空間補間による日射量推定
	課題⑧－3	CTC	気象衛星データを用いた日射量推定
日射量の予測	課題⑧－4	JWA	時間スケールに応じた日射量予測
	課題⑧－5	電中研	気象モデルによる日射量の予測
	課題⑧－6	CTC	気象予測モデルおよび統計手法を用いた日射量の予測
太陽光発電出力の推定	課題⑧－7	電中研	地域の太陽光発電導入状況に対応した太陽光発電出力推定
	課題⑧－8	CTC	統計手法を用いた太陽光発電出力推定
	課題⑧－9	日立	日射量推定結果からの太陽光発電出力推定
	課題⑧－10	三菱	各種統計モデルと配電線潮流を用いた配電-全体系統の太陽光発電出力推定
	課題⑧－11	SF	統計処理による太陽光発電量推定
日射量の分析	課題⑧－12	東大	日射量データ分析

ＪＷＡ　一般財団法人 日本気象協会
電中研　一般財団法人 電力中央研究所
ＣＴＣ　伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
日立　株式会社 日立製作所
三菱　三菱電機株式会社
ＳＦ　ソーラーフロンティア株式会社
東大　国立大学法人 東京大学

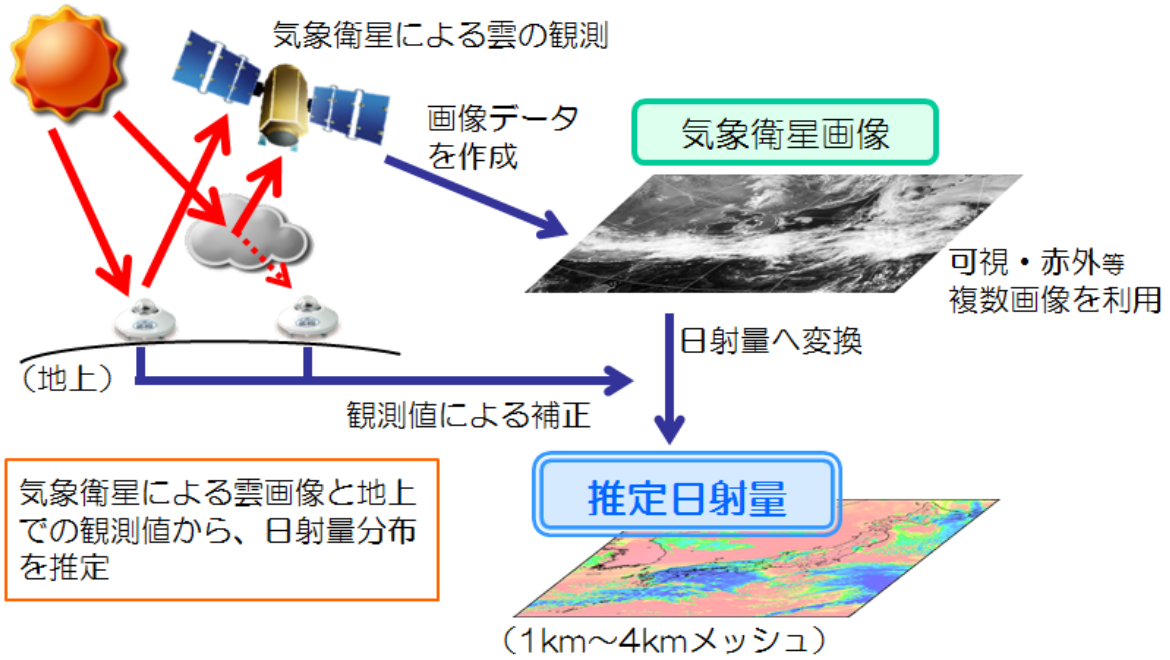
３．目標 ＜日射量の把握＞

要素技術	目標･指標	妥当性･設定理由･根拠等
日射量観測データや気象衛星データからの日射量推定（課題⑧－１）	統合日射量データベースを構築する。	日射量観測データや気象衛星データからの日射量推定技術を用いた全国規模の実況日射量分布推定モデルの開発に必要なため。
空間線形回帰法（クリギング）に基づく空間補間による日射量推定（課題⑧－２）	リアルタイムの日射量マップの作成を目指し、地球統計学の空間線形回帰法（クリギング）に基づく日射の空間補間法を地域PV発電出力把握に適した手法に改良する。	データ入手のタイムラグを極小化することが期待できる日射計観測データを用いて、未計測地点の日射量を空間補間する技術の開発を行うため。
気象衛星データを用いた日射量推定（課題⑧－３）	水平スケール別・天気パターン別に作成した日射量の評価指標値より、水平スケール別・天気パターン別の日射量推定手法の適用範囲を明確にする。	衛星情報等のデータから準リアルタイムで面的な日射量の推定を行うため。

3. 目標 ＜日射量の把握＞

気象衛星画像データによる日射把握の概要

▶ 気象衛星画像を元に、現在の日射量を推定する

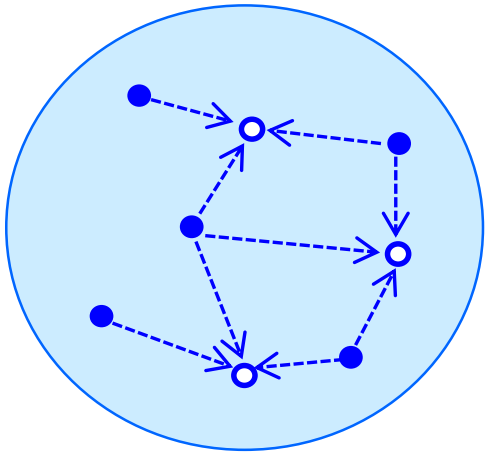


項目	内容
手法の概要	気象衛星データを用いた推定日射量を観測値で補正し、推定精度を向上させる。
推定結果出力	１～４ｋｍメッシュの日射強度
推定時間間隔	気象衛星画像の配信間隔による。
特徴	・上空からの観測であるため、広範囲を同じように推定することができる。 ・観測データを組み合わせることで、精度向上を図ることができる。 ・推定時期が気象衛星画像の配信に制約を受ける。

3. 目標 ＜日射量の把握＞

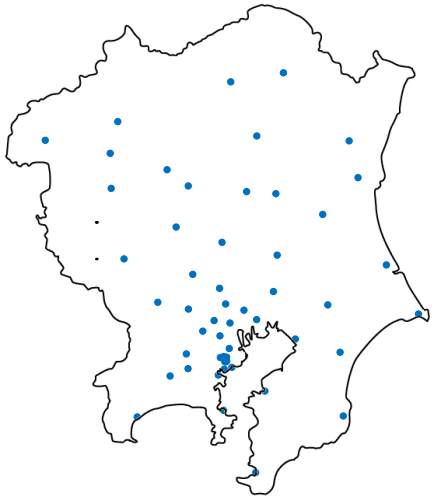
観測データ空間補間による日射把握の概要

推定イメージ

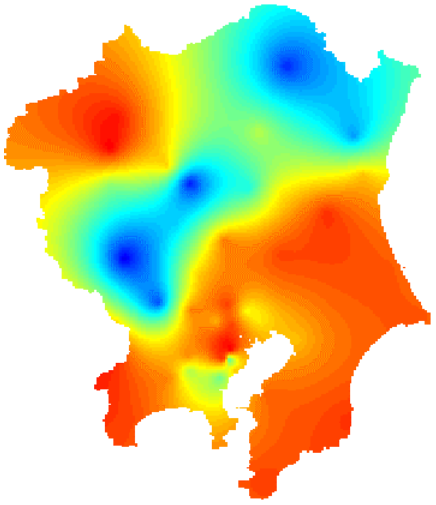


● 観測地点
○ 未観測地点（推定対象地点）

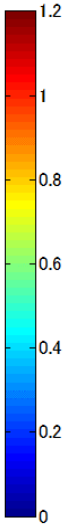
観測地点



推定結果



日射強度
[kW/m²]



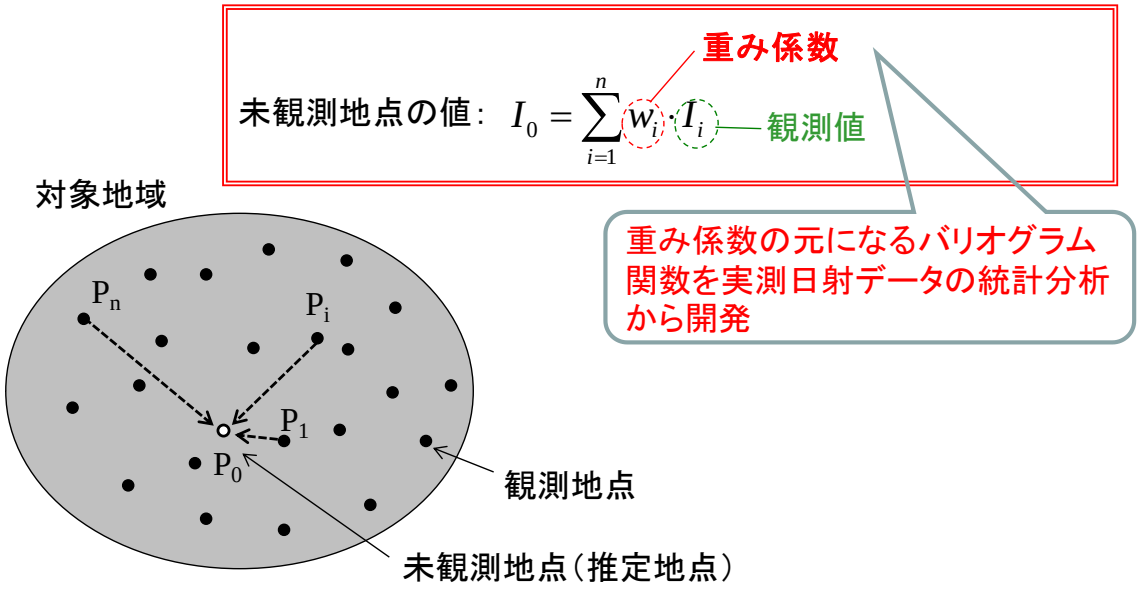
項目	内容
手法の概要	PV300等観測データを用いて、空間線形回帰法(クリギング)に基づく空間補間により推定を行う。
推定結果出力	１ｋｍメッシュの日射強度
推定時間間隔	観測周期による。
特徴	ほぼリアルタイムで日射を把握することができる可能性がある。 観測地点の有無、配置が推定精度を左右する。

3. 目標 ＜日射量の把握＞

【補足説明】空間線形回帰法（クリギング）とは

クリギング（kriging）とは、未観測地点の未知の物理量を観測地点の既知の値から、統計的に予め求めておいた距離依存性（バリオグラム（variogram）関数という）を用いて、誤差の期待値が数学的に最も少なくなるように推定する地球統計学の手法をいう。

ここでの物理量は日射量であり、未観測地点 P_0 の日射量 I_0 を、その周囲の観測地点 P_i (i=1~n)（nは観測地点数）の日射量観測値 I_i から空間補間推定する。

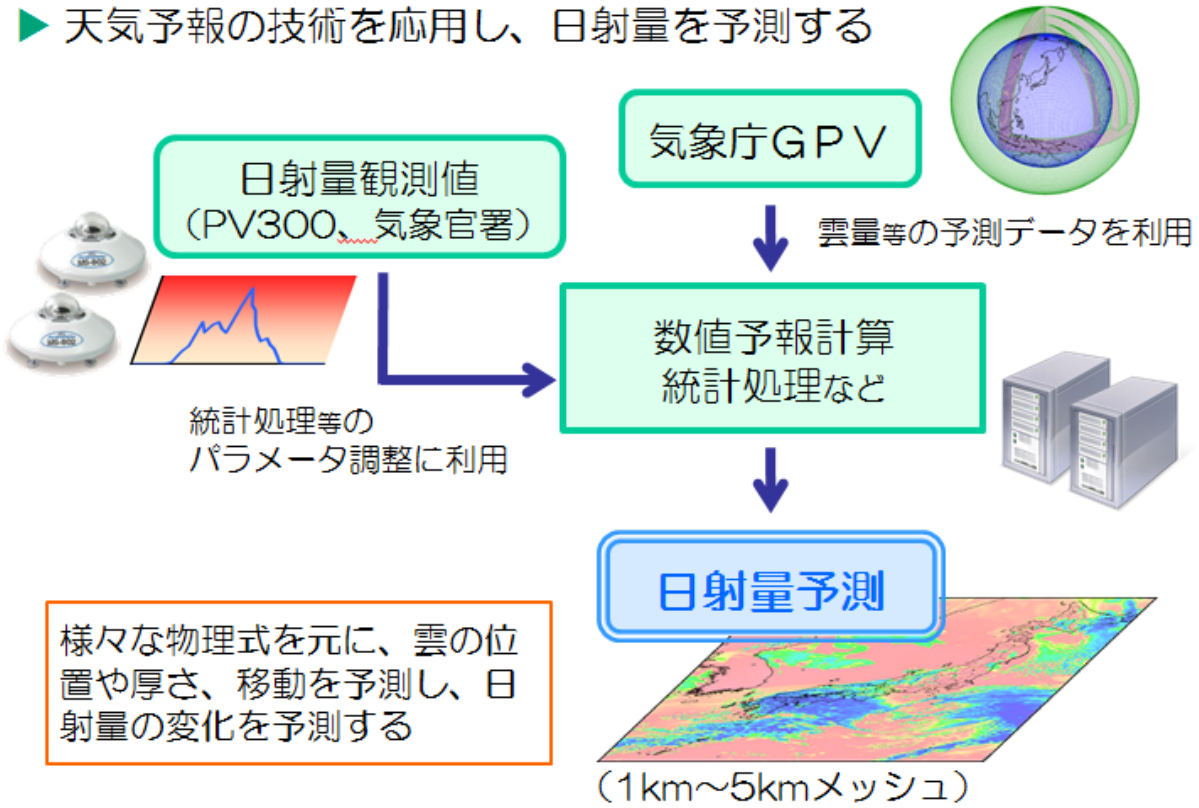


３．目標 ＜日射量の予測＞

要素技術	目標･指標	妥当性･設定理由･根拠等
時間スケールに応じた日射量予測（課題⑧－４）	日本気象協会保有の数値予報モデル（SYNFOS-3D）や統合日射量データベースなどを用いて日射量予測手法を開発する。	通常の気象要素（降水量、気温、風など）だけでなく、日射量、大気安定度などの予測が可能なSYNFOS-3Dや、日射量把握において構築した統合日射量データベースを用いることで、週間・翌日・当日・数時間先などの時間スケールに応じた日射量予測手法の開発が可能なため。
気象モデルによる日射量の予測（課題⑧－５）	電力中央研究所保有の気象予測・解析システム（NuWFAS）をベースとして、当日・翌日の気温・風速・日射量を予測する。	NuWFASは、各国の気象予報センターが日々実施している気象予測の格子点情報（GPV：Grid Point Value）を基に、特定地域の気象をより高解像度で予測する数値気象予測システムであり、日射量を直接予測することができるため。
気象予測モデルおよび統計手法を用いた日射量の予測（課題⑧－６）	数値予報データを利用した統計学的手法により日射量を予測するモデルを構築する。	気象庁数値予報データ（GPV）の雲量を元に、統計学的手法により予測を行うことで、演算時間を短くすることができるため。

3. 目標 ＜日射量の予測＞

気象予報技術応用による日射予測の概要



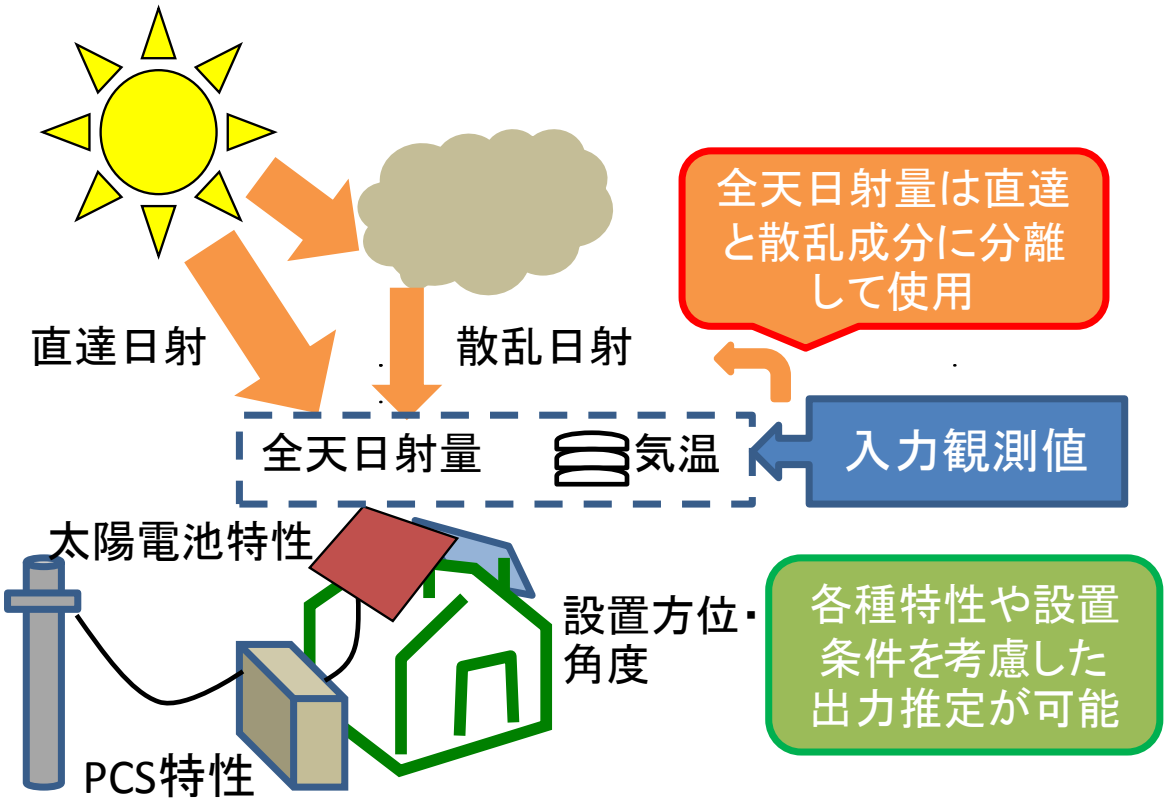
項目	内容
手法の概要	数値気象モデルや数値予報データにより予測する。
推定結果出力	１～５ｋｍメッシュの日射強度
特徴	・日射予測の目的に応じたパラメータ設定により気象モデルの改良を行い，精度を高めている。 ・特定地域の気象をより高解像度で予測できる。 ・予測演算に時間がかかる。

３．目標 ＜太陽光発電出力の推定＞

要素技術	目標･指標	妥当性･設定理由･根拠等
地域の太陽光発電導入状況に対応した太陽光発電出力推定（課題⑧－７）	地域PV導入状況の違いを考慮可能な推定法を検証し、実運用時に地域毎に予め調査が必要なPV設置状況の要素を整理する。	地域毎のPV導入状況（太陽電池種類、設置方位等）の違いに対応可能な日射・気象データからの地域PV発電出力推定手法を提示できるため。
統計手法を用いた太陽光発電出力推定（課題⑧－８）	日射量推定・予測値を元に、過去の実測データによる学習および補正などを適用しPV出力を推定する手法を開発する。	過去の実測データによる学習および補正等を行うことで、日射量から太陽光発電出力の推定精度向上を図ることができるため。
日射量推定結果からの太陽光発電出力推定（課題⑧－９）	太陽光パネル設置地点の位置、パネルの方位・角度・温度、さらにはパネルの種類やPCS（Power Conditioning Subsystem、パワーコンディショナ）の変換効率ほか様々な要因が、日射量から太陽光発電出力への推定に与える影響を整理する。	日射量から太陽光発電出力を推定するための様々な入力データの省略の可否を判断するため。
各種統計モデルと配電線潮流を用いた配電-全体系統の太陽光発電出力推定（課題⑧－１０）	配電線レベルの広さのPV出力の推定を行う手法を開発する。	太陽光発電出力の変化は、広域では電力系統の周波数に、狭域では地域の電圧に影響を与えるので、配電線レベルの広さのPV出力推定手法の開発が必要なため。
統計処理による太陽光発電量推定（課題⑧－１１）	簡易的な手法により、地域の日射強度から発電電力量を推定する手法を開発する。	収集可能な最低限の情報から地域発電量の推定値を求めるため。

3. 目標 ＜太陽光発電出力の推定＞

広域での太陽光発電出力推定の概要



項目	内容
手法の概要	日射量推定・予測値をもとに，過去の実測データによる学習および補正などを適用しPV出力を推定する。
推定メッシュ	５ｋｍ
特徴	日射量の推定・予測誤差も勘案し，天気パターン・エリア広さ別などで補正を行う。

３．目標 ＜日射量の分析＞

要素技術	目標･指標	妥当性･設定理由･根拠等
日射量データ分析（課題⑧－１２）	太陽光発電の大量普及時に、太陽光発電電力量の予測や出力を推定する技術の観点から、用途・目的に応じて日射量や太陽光発電の発電量データがどの程度の空間密度、計測サンプリングで必要であるかを考察する。	PV300で設置した日射計のデータを様々な角度から分析し、太陽光発電量の予測・推定を行っていくための計測装置の仕様や配置に関する提言を行うため。

4. 成果、目標の達成度 ＜日射量の把握＞

要素技術	目標･指標	成　果	達成度
日射量観測データや気象衛星データからの日射量推定（課題⑧－１）	統合日射量データベースを構築する。	気象衛星画像から日射量を推定する手法を、需給運用上のニーズに合うよう改良した。 衛星推定日射量に日射計観測値を用いた誤差補正を行うことで精度向上を図った。	達成
空間線形回帰法（クリギング）に基づく空間補間による日射量推定（課題⑧－２）	リアルタイムの日射量マップの作成を目指し、地球統計学の空間線形回帰法（クリギング）に基づく日射の空間補間法を地域PV発電出力把握に適した手法に改良する。	これまでの10km四方程度を推定する空間補間法を、電力系統の需給エリアで適用できるよう、面的広がりの大きさの違いによる変動平滑化効果を考慮して改良した。 日射量の空間補間法を元に、気温に関する空間補間を行う技術を開発した。	達成
気象衛星データを用いた日射量推定（課題⑧－３）	水平スケール別・天気パターン別に作成した日射量の評価指標値より、水平スケール別・天気パターン別の日射量推定手法の適用範囲を明確にする。	面的な日射特性の把握に必要な評価指標を選定し、天気区分別やエリアの広さ別等各状態における最大変化幅等を見積もることを可能とした。 衛星画像から推定した面的な日射量（東京大学竹中特任研究員作成）に対し観測値で補正し推定精度を向上する手法を構築した。	達成

4. 成果、目標の達成度 ＜日射量の把握＞

年間推定誤差 （RMSE：W/㎡）

エリアの大きさ	地域	課題⑧－１	課題⑧－２	課題⑧－３
１０ｋｍ四方	名古屋市中心	１６	８	４４
	横浜市付近	１５	１６	３９
２０ｋｍ四方	名古屋市内	１５	６	３３
	大阪市内	１２	９	３１
４０ｋｍ四方	愛知県西部	２０	１０	２８
	大阪市付近	１２	８	２４

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(ESTi - OBSi)^2}$$

EST ：推定値

OBS ：観測値

※ 基準日射強度： 1,000W/㎡

RMSE（Root Mean Square Error）：二乗平均平方根誤差
真値（今回の場合は観測値）からの“ばらつき”を表す。値が小さく0に近いほど精度が高いことを示す。なお，標準偏差を求める式と同じである。

衛星画像を使用する課題⑧－１と３の推定手法では、異なる地域においても推定誤差の違いはほとんどないことが確認できた。しかし、評価基準としたPV300観測値による補正の違いにより、課題⑧－１は観測地点が無い地域の影響を受けて愛知県西部の誤差が大きいのに対し、課題⑧－３はエリアが大きくなるほど平滑化効果により誤差が小さくなるなど、エリアの大きさよる誤差傾向に違いが見られた。

また、日射強度観測値を使用する課題⑧－２の推定手法では、この程度のエリアの大きさと観測地点数があれば、同じように推定ができた。

４．成果、目標の達成度　＜日射量の予測＞

要素技術	目標･指標	成　果	達成度
時間スケールに応じた日射量予測（課題⑧－４）	日本気象協会保有の数値予報モデル（SYNFOS-3D）や統合日射量データベースなどを用いて日射量予測手法を開発する。	数時間先の予測は気象モデルではなく移動予測手法を用いるなど、予測する時間スケールにより予測手法を変えた。 翌日予測では、気象モデルに統計的手法を組み合わせて、精度の向上を図った。	達成
気象モデルによる日射量の予測（課題⑧－５）	電力中央研究所保有の気象予測・解析システム（NuWFAS）をベースとして、当日・翌日の気温・風速・日射量を予測する。	既開発の気象予測・解析システムを、翌日・当日の日射量を予測するシステムに改良し、予測を行った。	達成
気象予測モデルおよび統計手法を用いた日射量の予測（課題⑧－６）	数値予報データを利用した統計学的手法により日射量を予測するモデルを構築する。	気象庁数値予報データ（GPV）の雲量を入力データとし、統計解析により日射量予測値を出力するモデルを作成した。	達成

4. 成果、目標の達成度 ＜日射量の予測＞

翌日予測の年間推定誤差 （RMSE：W/㎡）

エリアの大きさ	地域	課題⑧－４	課題⑧－５	課題⑧－６
１０ｋｍ四方	名古屋市中心	１２２	１６６	１２８
	横浜市付近	１３４	１６１	１３２
２０ｋｍ四方	名古屋市内	１１８	１５２	１２１
	大阪市内	１２０	１４８	１２８
４０ｋｍ四方	愛知県西部	１１０	１３８	１１４
	大阪市付近	１０８	１２９	１１７

当日予測の年間推定誤差 （RMSE：W/㎡）

エリアの大きさ	地域	課題⑧－４	課題⑧－５	課題⑧－６
１０ｋｍ四方	名古屋市中心	１０９	１５６	１１３
	横浜市付近	１０８	１５３	１１３
２０ｋｍ四方	名古屋市内	１０４	１４３	１０９
	大阪市内	１１３	１４１	１２０
４０ｋｍ四方	愛知県西部	９６	１２７	１０３
	大阪市付近	１０１	１２５	１１０

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(FOREi - OBSi)^2}$$

FORE ：推定値

OBS ：観測値

※ 基準日射強度： １,０００W/㎡

年間の翌日予測の誤差、当日予測の誤差を示す。

まず、同じ課題ごとでみると、異なる地域において、予測誤差の違いはほとんどなかった。また、エリアが大きくなるほど誤差は小さくなった。これは、広い範囲の予測結果の平均をとることで、予測誤差が空間的に平滑化されているためと考えられる。

なお、翌日予測と当日予測を比べると、当日予測のほうが予測誤差は10%程度小さくなっている。

4. 成果、目標の達成度 ＜太陽光発電出力の推定＞

要素技術	目標･指標	成　果	達成度
地域の太陽光発電導入状況に対応した太陽光発電出力推定（課題⑧－７）	地域PV導入状況の違いを考慮可能な推定法を検証し、実運用時に地域毎に予め調査が必要なPV設置状況の要素を整理する。	地域のPV導入状況に対応したPV出力推定を可能とする個別PVの発電出力推定手法の精度評価を行い、出力推定に影響を与える要素（パネルの方位、角度など）を整理した。	達成
統計手法を用いた太陽光発電出力推定（課題⑧－８）	日射量推定・予測値を元に、過去の実測データによる学習および補正などを適用しPV出力を推定する手法を開発する。	需給計画・運用のニーズに基づきPV出力を推定する時間・空間解像度を決定した。 PV出力に大きな影響を与える日影および積雪について、推定精度向上のための評価を行った。	達成
日射量推定結果からの太陽光発電出力推定（課題⑧－９）	太陽光パネル設置地点の位置、パネルの方位・角度・温度、さらにはパネルの種類やPCSの変換効率ほか様々な要因が、日射量から太陽光発電出力への推定に与える影響を整理する。	PVパネル設置方向と傾きを推定する手法を検討し、ほぼ正しく推定できる見込みが得られた。 PVの出力推定および出力予測アルゴリズムの開発のための誤差要因を分析し、観測地点毎と、複数の観測地点があるエリアのPV出力推定モデルに適用し、精度を確認した。	達成
各種統計モデルと配電線潮流を用いた配電-全体系統の太陽光発電出力推定（課題⑧－１０）	配電線レベルの広さのPV出力の推定を行う手法を開発する。	PV出力と日射量・気温、需要の関係をモデル化するために計測データの分析を行い、相関を求めた。 配電（地域）レベルのPV出力推定機能の開発を行い、需要モデルを利用することで、精度が上がることを確認した。	達成
統計処理による太陽光発電量推定（課題⑧－１１）	簡易的な手法により、地域の日射強度から発電電力量を推定する手法を開発する。	簡易な統計手法を用いた発電量推定モデルを構築した。	達成

4. 成果、目標の達成度 ＜太陽光発電出力の推定＞

広域での太陽光発電出力推定の年間推定誤差（RMSE：%）

エリアの大きさ	地域	課題⑧－７	課題⑧－８	課題⑧－１１
１０ｋｍ四方	富山市付近	６	５	５
２０ｋｍ四方	京浜地区	４	５	４
３０ｋｍ四方	名古屋市付近	２	３	９（５）

広域での太陽光発電出力の年間推定誤差を、太陽電池出力定格値を基準としたRMSE(%)により示す。

地域、エリアの大きさに関わらず、同程度の誤差の大きさとなった。なお、富山市付近など積雪の影響を受ける地域では、日射があっても発電しないことによる誤差の拡大も考えられる。

また、課題⑧－11については、過去のデータを元に補正をかけるため、学習期間にシステムに不具合があると精度が悪くなる（名古屋市付近の9%）。しかし、不具合データを排除すると、同等の結果が得られる（括弧内5%）。

4. 成果、目標の達成度 ＜日射量の分析＞

要素技術	目標・指標	成　果	達成度
日射量データ分析（課題⑧－１２）	太陽光発電の大量普及時に、太陽光発電電力量の予測や出力を推定する技術の観点から、用途・目的に応じて日射量や太陽光発電の発電量データがどの程度の空間密度、計測サンプリングで必要であるかを考察する。	PV300で設置した日射計のデータを様々な角度から分析し、太陽光発電の大量普及時に太陽光発電電力量の予測や出力を推定する技術の観点から、電力システムの運用という用途・目的に応じて日射量や太陽光発電の発電量データがどの程度の空間密度、計測サンプリングで必要であるかを考察するための基礎分析を行った。	達成

4. 成果、目標の達成度

特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数（出願を含む）	国際標準への寄与
日射量の把握	3	0	0	0
日射量の予測	3	0	0	0
太陽光発電出力の推定	5	0	0	0
日射量の分析	2	0	0	0
全般	5	0	0	0
計	18	0	0	0

５．事業化、波及効果

○　事業化の見通し

利用主体となる電力会社が参加することで、日々の需給運用に基づくニーズを反映した、太陽光発電の現在出力の把握や出力予測という新規技術の開発ができた。

ここで開発した新規技術は，各電力会社の需給システムに要素技術として適用され、それぞれの需給システムに応じて開発・導入される見込みである。

また、日射量の予測に関する基礎技術の向上に資するため、太陽光発電事業者あるいは一般の太陽光発電導入者にとってもより的確な将来発電量予測の礎として活用される可能性が見込まれる。

○　波及効果

より正確な日射量予測のためには、基礎となる気象予測技術の精度向上が不可欠であることから、気象予報の高精度化に対する強いニーズとなり、幅広い分野へ天気予報高精度化の恩恵があるものと見込まれる。

また、本事業により、正確な太陽光発電の出力把握・出力予測手法が早期に確立できれば、需給バランス確保のために必要なバックアップ電源やすべての需要家における太陽光発電の出力状況の把握が不要となるなど電力設備等の合理化が可能となることが期待される。

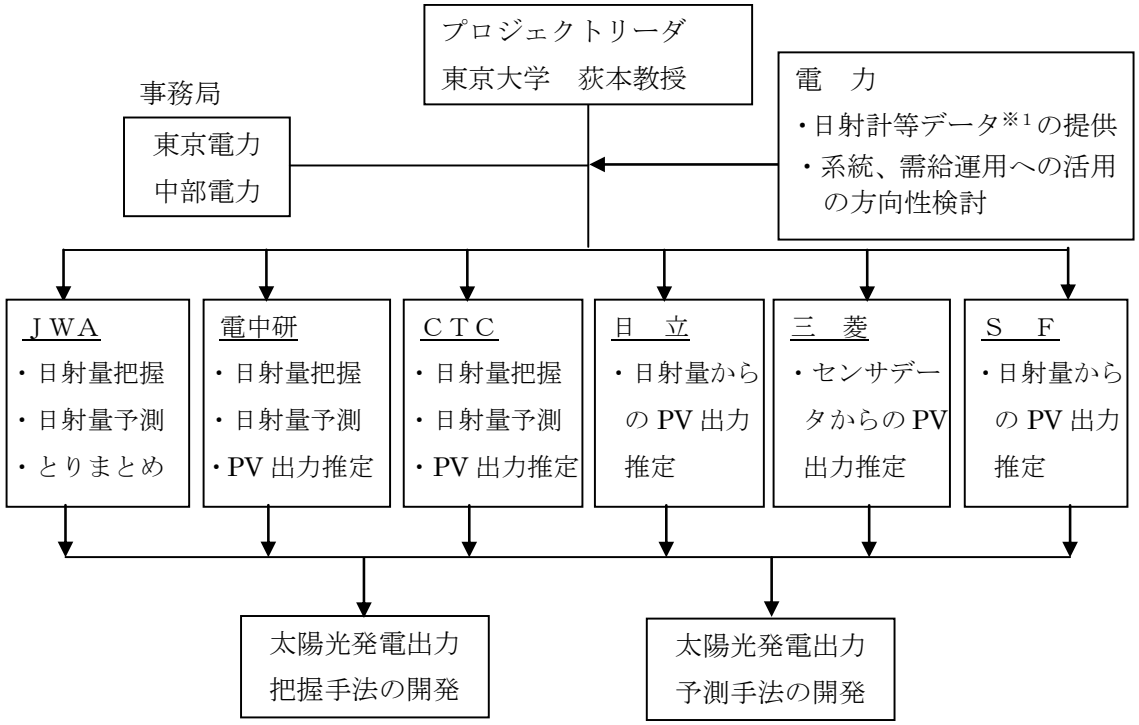
さらに、火力設備や蓄電設備の計画的・効率的な運用に資することによって、これら設備の長寿命化や運用コストの低下をもたらす、等の効果も期待できる。

６．研究開発マネジメント・体制等

本事業は、経済産業省資源エネルギー庁電力基盤整備課の公募による選定審査手続きを経て、東京大学・伊藤忠テクノソリューションズ・ソーラーフロンティア・日本気象協会・日立製作所・三菱電機・電力中央研究所・電力10社の計17法人の共同申請により採択を受けて実施した。

事業の実施にあたっては、技術開発を統括するためのプロジェクトリーダ（東京大学 生産技術研究所 荻本和彦特任教授）のもと、課題担当法人間の連携や事業の進捗管理を行うための事務局を設置し、下図に示す体制とした。

なお、本事業は、太陽光発電の大量普及に伴う諸課題解決のために実施している「次世代送配電系統最適制御技術実証事業（事務局：東京電力）」「次世代型双方向通信出力制御実証事業（事務局：東京電力）」と連携を図りながら取り組んでいる。



凡例　電　力：電力１０社
ＪＷＡ：一般財団法人　日本気象協会
電中研：一般財団法人　電力中央研究所
ＣＴＣ：伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
日　立：株式会社 日立製作所
三　菱：三菱電機株式会社
Ｓ　Ｆ：ソーラーフロンティア株式会社
※１　分散型新エネルギー大量導入促進系統安定対策事業で設置した各種センサのデータ

7. 事前評価の結果

本事業の実施に向けての評価小委員会委員からのコメントに対する対処方針

コメント	対処方針
○ 太陽光の出力制御は、気象予測が出来れば良いとの一面と、太陽光パネル自体が気象情報のセンサーになっているとの点から、既存のインフラとの親和性、統合を考えると、限られた情報にしか注目していないと考えられる。	○ 太陽光発電の出力は、太陽光パネルや PCS の特性・設置状況、気温・日射量等により変化。 ○ 太陽光発電が大量に導入された場合、各太陽光パネルの出力状況等に関する情報を収集すると相当なコストを要するため、代表地点に日射量計等を設置し、当該データ等を活用した出力予測技術の開発・評価をすることは有効。 ○ 将来的には、配電系統等に設置したセンサー等を活用し太陽光発電の出力予測を行っていくことも想定されるなど、既存インフラの最大活用等を図っていく。
○ 様々な通信インフラをエネルギーに活用するという提案も出来ている中、通信インフラの活用が弱いレベルにとどまっているのではないか。	○ 通信インフラのエネルギーへの活用については、技術的実現性や社会的受容性、電力の安定供給等に配慮しつつ、検討していく方針。

新規研究開発事業「太陽光発電出力予測技術開発実証事業」に関する事前評価報告書
平成22年7月　産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会

参考資料２　各実施事業に係る困難事例について

失敗事例・困難事例：1700℃級ガスタービン実証事業

①現象： 燃焼器の開発当初、燃焼方式選定のフィルタリングの段階で、リッチ・リーン燃焼方式※（図1、図2）が、想定していたほどNOx低減が出来なかった。

②原因推定： リッチ・リーン燃焼方式による低NOx化のためには、リッチ領域とリーン領域を急速混合（2~3msec以下）させる必要があったが、混合にかなりの時間（燃焼器の滞留時間10msecほど）を要し（図3）、その間にリッチ領域でNOxを多量に生成し、当初想定した低NOxメカニズムが発揮できなかった。

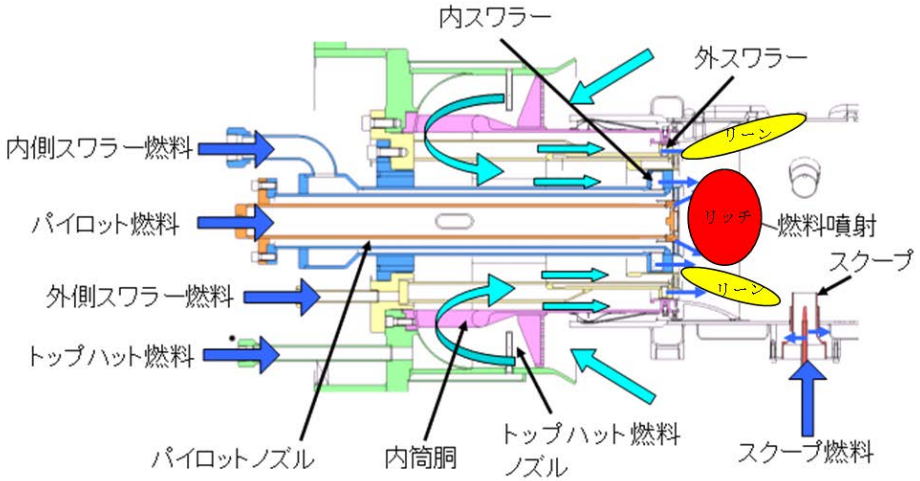
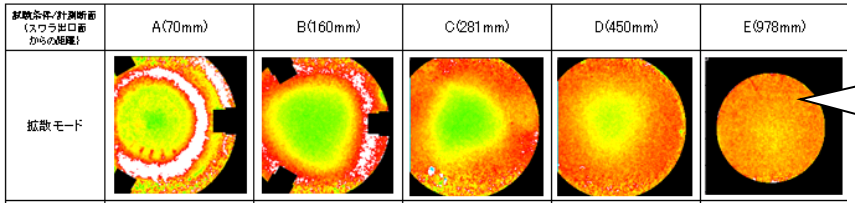


図1 リッチ・リーン燃焼方式

※リッチ・リーン燃焼方式：
燃焼器内にて、NOx生成が低い、超希薄（リーン）側の予混合燃焼と超過濃（リッチ）の予混合燃焼を領域を分けて形成させ、燃焼後に両者をすぐに混合させることにより、通常の一様均一混合燃焼よりも低いNOxを達成する方法。



混合するのに、長い距離（時間）かかってしまっている。

図3 気流試験による、濃度混合計測結果

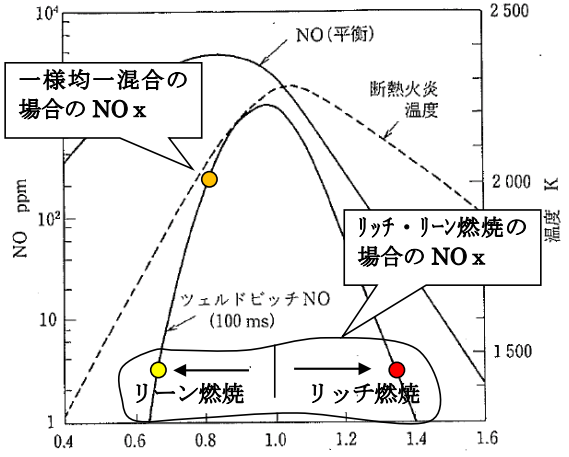


図2 大気圧燃焼試験によるNOx計測結果

③対応策： リッチ領域とリーン領域の混合時間を更に短くすることは、燃焼器の構造的に実現困難であった。そこで、従来の一様均一予混合方式を採用し、EGR比率も採用することで、目標NOx50ppm以下を達成できる見通しがついたため、リッチ・リーン燃焼方式から均一予混合方式を採用するように方針変更した。

④結果： 図4の大気圧の試験結果から、予混合燃焼方式が、リッチリーン燃焼方式より、より低いNoxを達成できることを確認した。

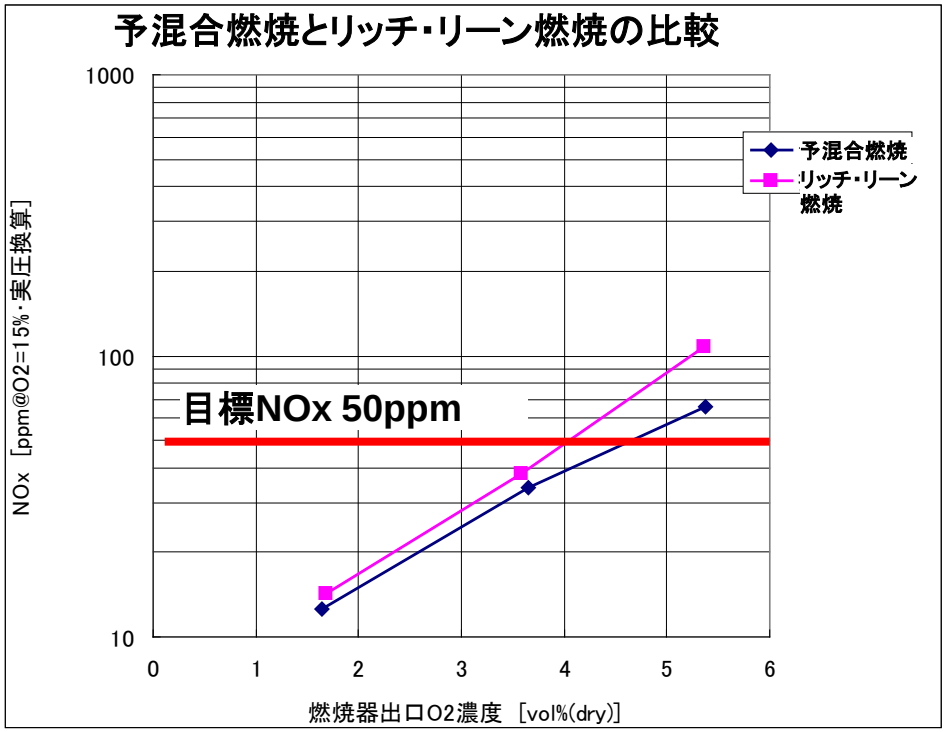


図4　大気圧燃焼試験によるNOx計測結果

平成25年11月20日　(株)日立製作所

高効率ガスタービン技術実証事業(AHAT) 補足説明資料

1. 再生熱交換器の問題と対応

開発の際に発生した問題として、再生熱交換器本体と排ガス入口ダクト間を接続する非金属製伸縮継手での漏洩および損傷が発生した。

ガスタービンから排出される排ガスは、排ガスダクトを通して各熱交換器本体へ分配される。排ガスダクトと熱交換器本体との接続部分には、起動停止及び運転時の熱伸縮や熱衝撃を緩衝する機能が必要なため、排ガスダクトと熱交換器本体の間に非金属製の伸縮継手を取り付けている。伸縮継手は、仕様条件を考慮した伸縮性能、断熱厚さ、接続構造としていたが、40MW 総合試験運転中に伸縮継手部で排ガスの漏洩が確認された。(図 1)

調査した結果、伸縮継手内面のバッフル(導風板)に割れが発生していること、フランジ締結部やフレキ本体取付部の多くでボルトの緩みが発生していることが分かった。

バッフルは溶接組立による一体構造で、フランジ部を設けて排ガスダクトと伸縮継手のフランジ締結部に共締めしているため、バッフルが拘束されてコーナー部分に大きな熱応力が発生する構造であること、フランジとバッフルの共締めによりフランジ締結部のシール性が不足していることが漏洩と損傷の原因と推定した。

それらの対策を織り込んだ改良型伸縮継手の設計を行った。バッフルは、フランジ締結部と分離した構造として、バッフルの拘束を緩和し、フランジ締結部の共締めもなくして締め付け不足を改善した。フレキ本体の構造も見直し、四角断面構造を角丸四角断面構造とした上、複雑な両端フランジ曲げ構造でなく単純な筒状構造に変更してフレキ本体の加工性、その取付部構造を気密性の高い構造に変更した。(図 2)

改良型伸縮継手を 40MW 総合試験設備で使用する再生熱交換器に採用してその効果を確認を行った。改良型伸縮継手では、排ガスダクトと熱交換器本体とのフランジ締結部やフレキ本体締付部でのボルトの緩みは確認されず、改良型伸縮継手部から外部への排ガスの漏洩も確認されていない。

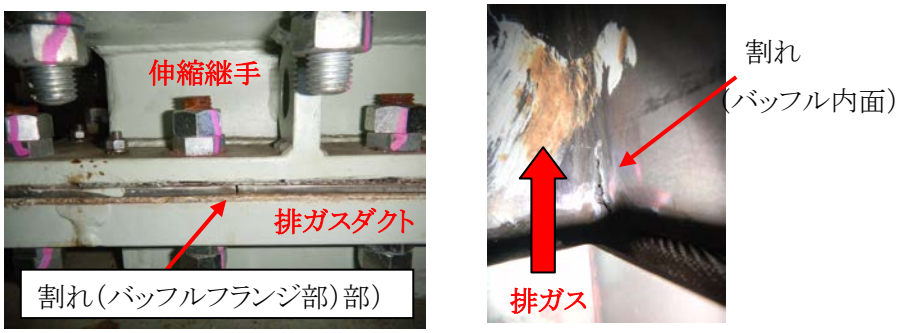


図 1　伸縮継手内面のバッフル(導風板)割れ状況

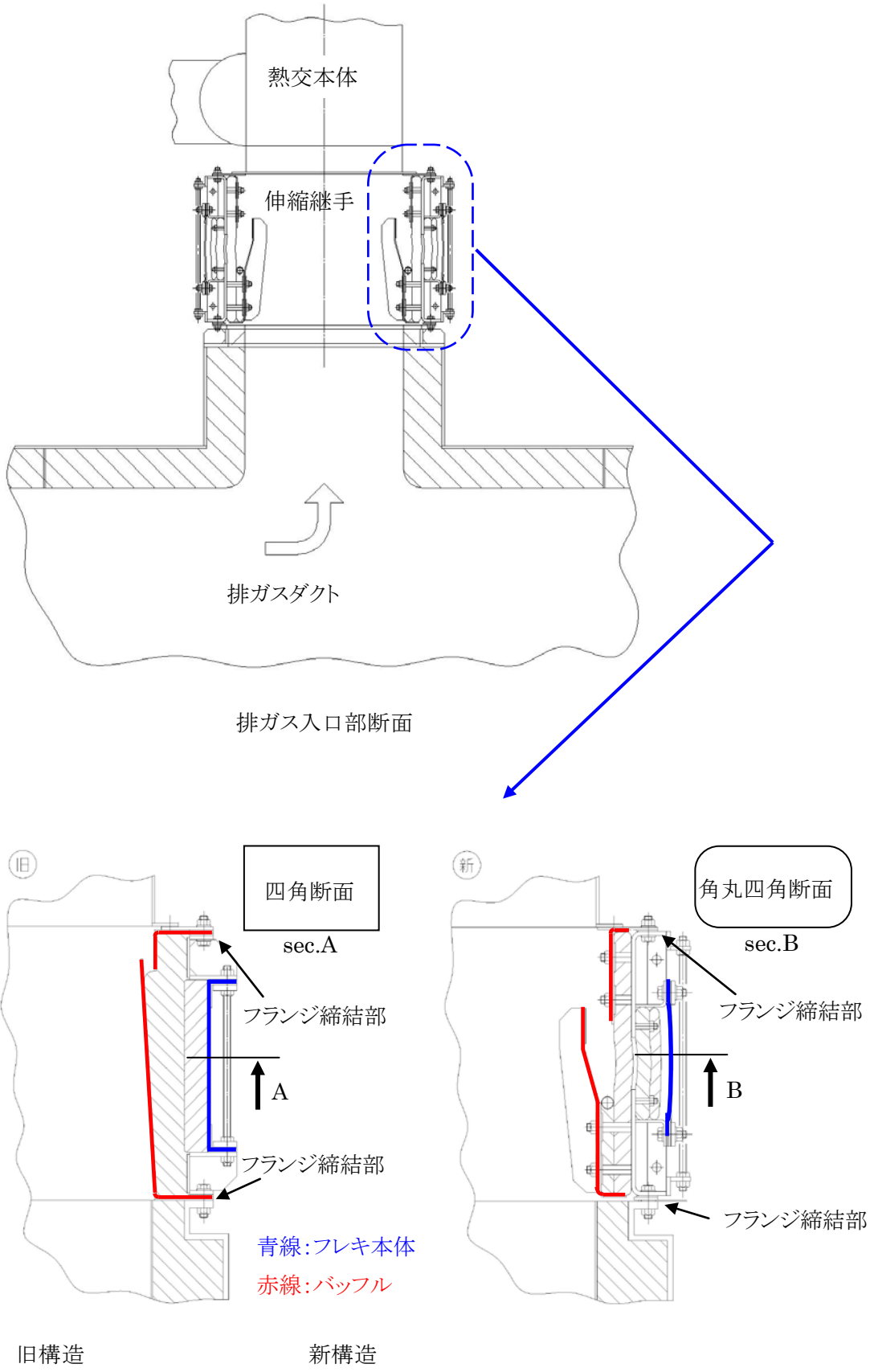


図 2　非金属製伸縮継手構造(新旧比較)

2. 加湿管の問題と対応

40MW 級総合試験装置は、事業用の重構造ガスタービンの高湿分空気利用ガスタービンへの適用性を検証することが主目的であり、加湿管は、簡易なスプレイ式を採用した。50%負荷までの運転で、スプレイ式の加湿管のドレン発生割合が 40%以上と大きく、加湿量も計画値(出力 20MW の場合 5.7kg/s)よりも少ないことが、負荷上昇のためのクリアすべき課題となっていた。そこで、CFD により、加湿管内部の空気および噴霧液滴の流れを解析したところ、表 1 (左)に示すように、改良前は加湿管入口の拡大部で剥離が発生し、外周部に大きな逆流域が発生していることが推定された。そこで、スプレイノズルの上流側に、流れに対して垂直な多孔板(パンチングプレート)を挿入し、空気の流速分布を均等化する改良案を検討した。改良後の流線、全圧分布を表 1 (右)に示す。パンチングプレートを設置すると、下流側における逆流域は大きく縮小し、また、スプレイノズルよりも上流側への液滴の逆流は見られない計算結果となった。さらに、液滴が加湿管の内壁面に衝突する割合も、改良前は 46.4%だったものが改良後は 5.1%となり、ドレン発生率の低減が期待される結果となった。

実際に加湿管にパンチングプレートを設置して運転した効果を、改良前と比較して表 2 に示す。同表に示すように、改良後のドレン発生割合は25%以下に低下し、加湿量(蒸発量)も計画値を上回り、当初計画通りにガスタービンの負荷試験が可能となった。

表 1 加湿管へのパンチングプレート挿入効果の CFD による予測

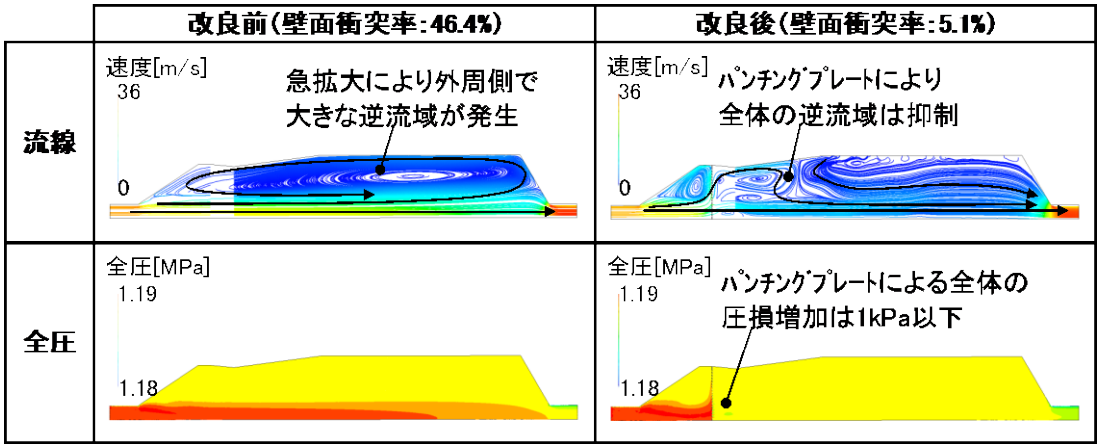


表 2 40MW 級総合試験装置の加湿管の計画時運転条件と運転結果

	項目	単位	2/4負荷					4/4負荷		
	流速分布の均等化改良		計画値	改良前		改良後		計画値	改良後	
条件	RUN No.	–	–	RUN39	RUN45	RUN52	RUN79	–	RUN73	RUN69
条件	GT出力	MW	19.6	20.0	20.2	21.5	24.4	37.0	41.1	47.3
条件	WAC噴霧量(対吸気比)	%	–	0.0%	1.4%	0.0%	0.0%	2.0%	0.7%	1.6%
条件	スプレイ流量	kg/s	6.9	3.9	6.5	7.9	6.9	8.2	6.8	8.5
結果	加湿量(蒸発量)	kg/s	5.7	3.1	3.8	6.0	5.9	6.8	6.4	7.1
結果	ドレン発生割合	%	17	22	42	24	15	17	6	17
結果	加湿管出口空気絶対湿度	kg/kg'	0.092	0.059	0.084	0.123	0.099	0.104	0.092	0.109

困難事例：先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発事業

（１）ボイラ要素技術開発

6 種類の Ni 基合金と 3 種類の 9Cr 鋼を試作し、3 万時間程度の短時間材料試験を実施した。この試験結果を 10 万時間まで外挿することにより、目標を達成できる見通しが得られた。今後、実際に 10 万時間まで試験を継続し、確認をする。

図 3-5 に試作した候補材料を示す。

HR6W、HR35、Alloy617、Alloy263、Alloy740、Alloy141 は Ni 基合金である。

B-9Cr、SAVE12AD、LC-9Cr は耐熱温度を向上した鉄鋼材料である。

図 3-6 には試作した Ni 基大径管と小径管を示す。材料加工特性試験を実施した結果、大径管の製造に適した材料としては HR6W、HR35、Alloy617 を選んだ。試作した大径管は曲げ試験、溶接試験等に供された。

図 3-7 には高周波加熱曲げ加工後の Ni 基大径管（Alloy617、HR6W）の例を示す。加熱温度を調整した結果、どちらも曲げ加工可能だった。

図 3-8 には Ni 基大径管と小径管(異材溶接)の溶接継手の例を示す。一部に高い溶接割れ感受性を示す材料があったが、概ね良好な溶接施工を行うことができた[注1]。

図 3-9 にはこれまで開発してきた大径管、小径管、溶接技術、管曲げ技術を総合的に検証するために製作した伝熱器ヘッダーのモックアップを示す。

図 3-5　ボイラ候補材料

図 3-6　試作した Ni 基合金製大径管と小径管

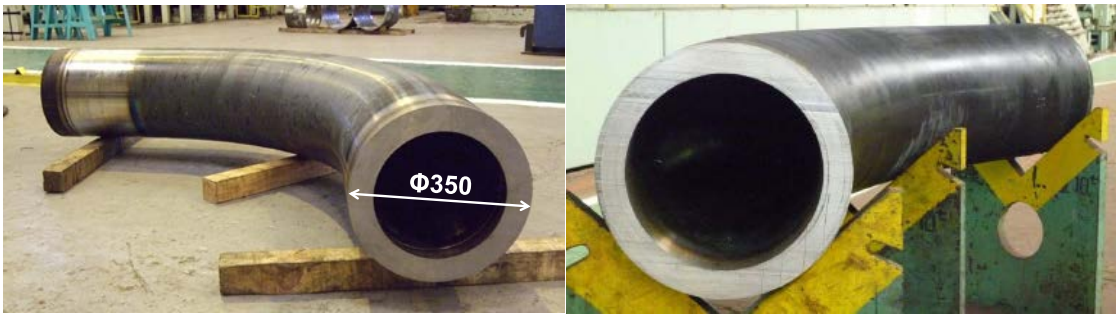


図 3-7　Alloy617 と HR6W の曲げ試験

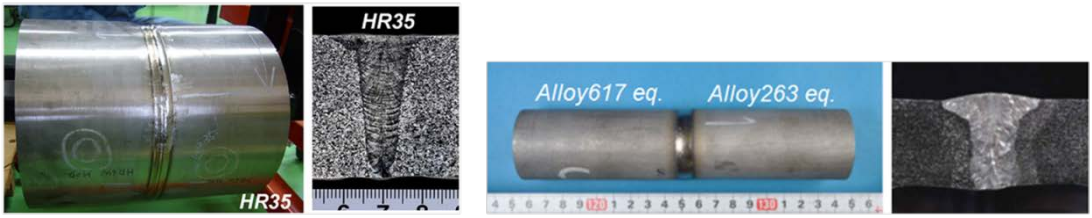


図 3-8　大径管と小径管(異材溶接)の溶接継手

図 3-9　再熱器、過熱器ヘッダーモックアップ

（２）タービン要素技術開発

3 種類の Ni 基中型、大型ロータ材料（FENIX700、LTES700R、TOS1X）と 3 種類の Ni 基中型、大型ケーシング材料（Alloy617、Alloy625、Alloy740）を試作し、3 万時間程度の材料試験を実施した。この試験結果を 10 万時間まで外挿することにより、目標を達成できる見通しを得た。今後、実際に 10 万時間まで試験を継続し、確認をする。

図 3-10 にはロータ試作の代表例として TOS1X の状況を示す。前回中間評価時点では 7 トンの素材の試作が可能だったが、現在では 13 トンまで製作可能である。TOS1X は Alloy617 をベースとして開発され、高い強度を得ている。

もうひとつのロータ材料の例として、LTES700R の線膨張係数を図 3-11 に示す。一般の Ni 基合金よりも低い線膨張係数になるように設計された材料であり、鉄鋼材料（2.25Cr Steel, Conventional 12Cr Steel）と同じレベルの値を有している。そのため、鉄鋼材料と溶接などにより組み合わせたときに発生する熱応力を抑えることができる。LTES700R はもともと小型のボルト用材料として開発された LTES700 を大型ロータ材料向けに改良した材料である。LTES700R の線膨張係数は LTES700 より高くなっているものの従来の Ni 基合金や 2.25Cr 鋼より低いレベルになっている。

タービンロータは一般に 30~40 トンの重量であり、一体の Ni 基合金で製作することは難しい。そのため、Ni 基合金の共材溶接、Ni 基合金と鉄鋼材料の異材溶接技術を開発した。図 3-12 にタービンロータの溶接（異材、共材）試作例を示す。

ケーシング材料については、新たな開発は行わず、既存材料の中で蒸気タービンのケーシング材に最も適した材料の選定を行うこととした。候補としては Alloy617、Alloy625、Alloy740 があり、参加各社で分担し大型鋳物を試作した（図 3-13）。当初は図左側のステップブロックを試作し、これらの材料から切り出した試験片により材料特性評価を行なった。その結果選定された材料で大型の内部ケーシング、ノズルボックスを試作した。

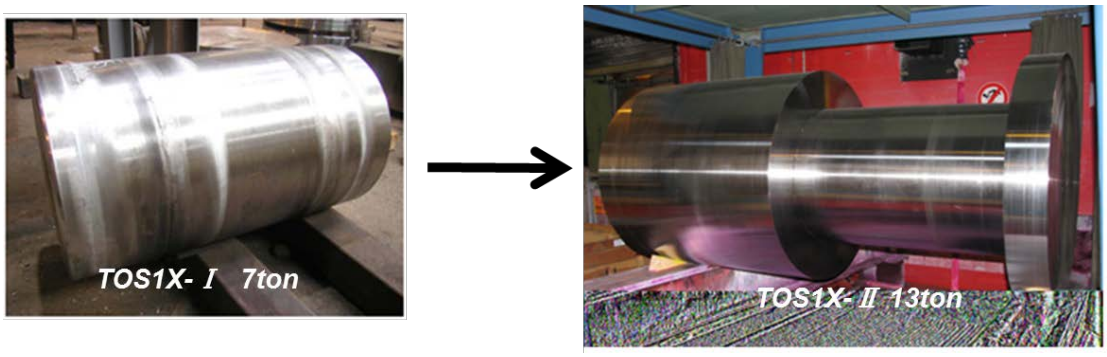


図 3-10　タービンロータ材料の大型化（TOS1X）

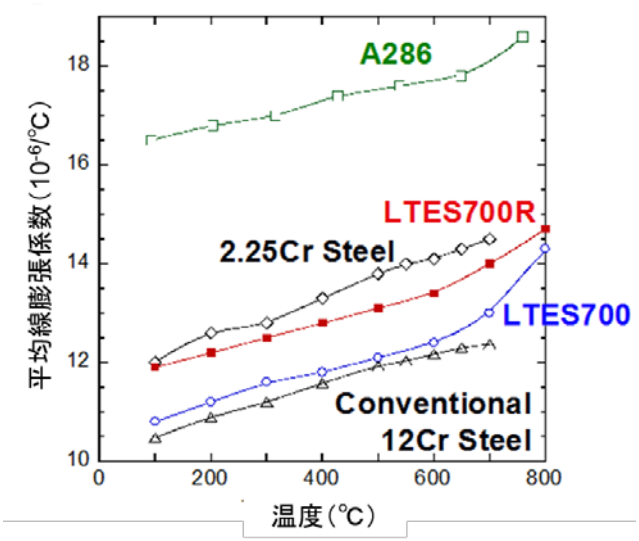


図 3-11　タービンロータ用低熱膨張合金 LTES700R

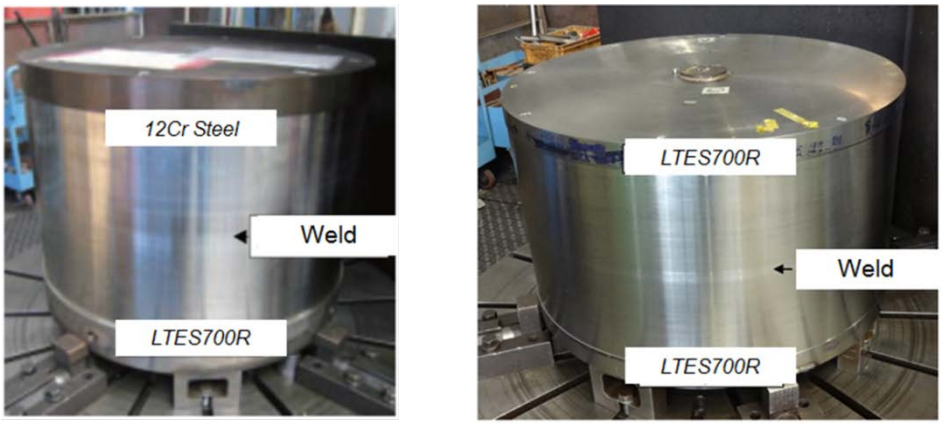


図 3-12　タービンロータの溶接（異材、共材）

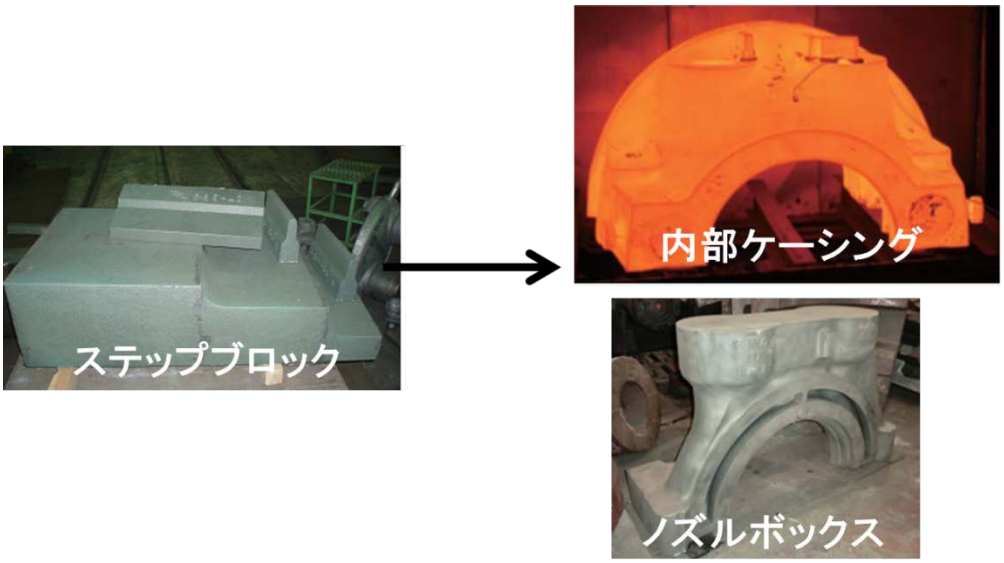


図 3-13　タービンケーシング用 Ni 基鋳物試作

（４）高温弁要素技術開発

弁材料の摺動試験、水蒸気酸化試験等を実施し、700℃条件下で使用できる材料の組合せがあることを見出した。

実機高温弁の設計を実施し、鋳造による大型弁ケーシングの製造性を確認した。図 3-14 に各種高温弁、図 3-15 に試作された 9 トンの弁ケーシングを示す。

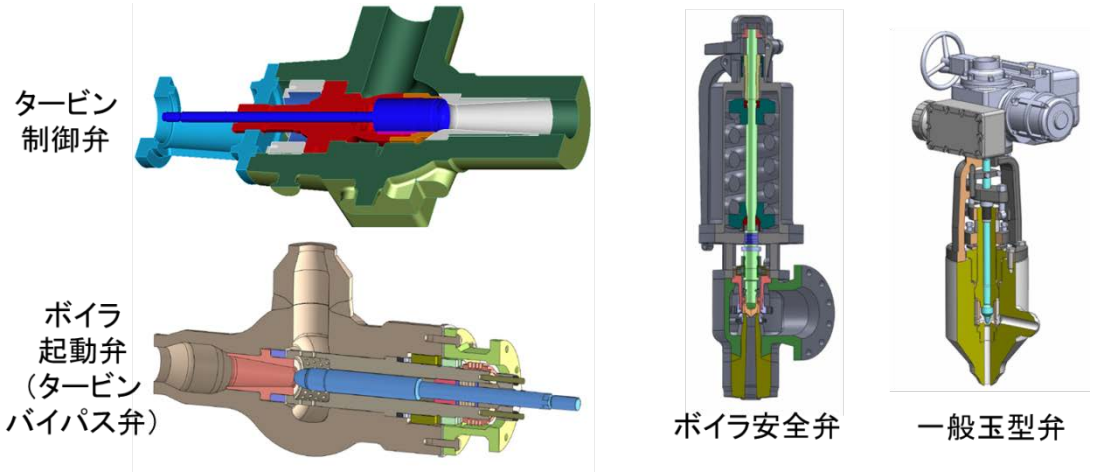


図 3-14　高温弁

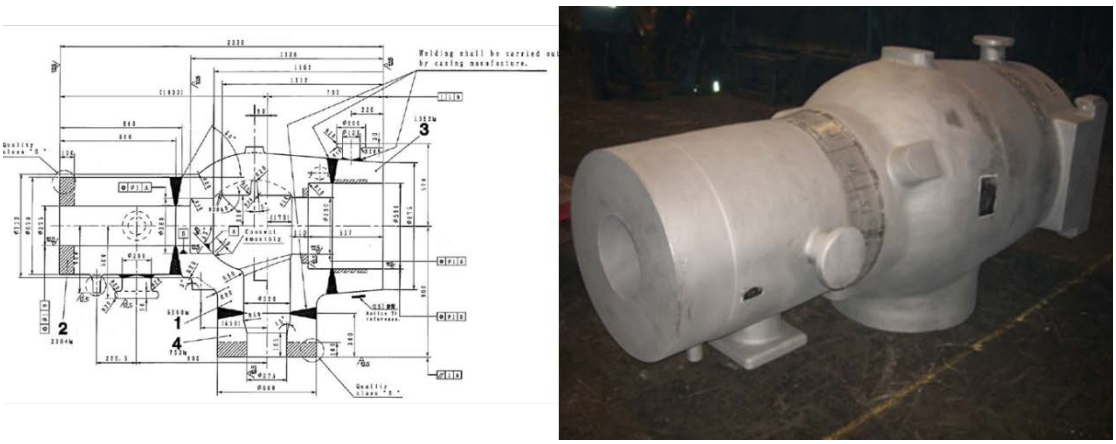


図 3-15　高温弁ケーシング(Alloy625,約 9ton)

（４）実缶試験・回転試験

実缶試験・回転試験ともに基本設計を実施、完了した。

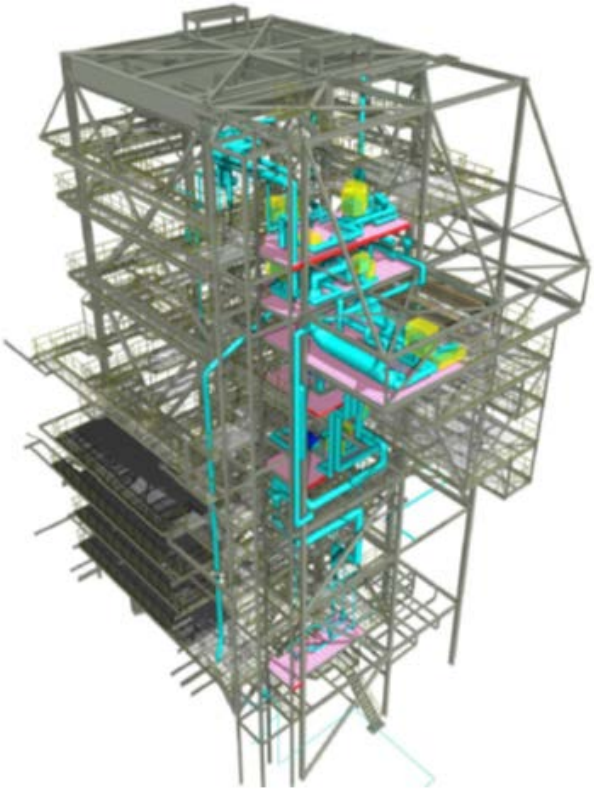


図 3-16　実缶試験装置計画図

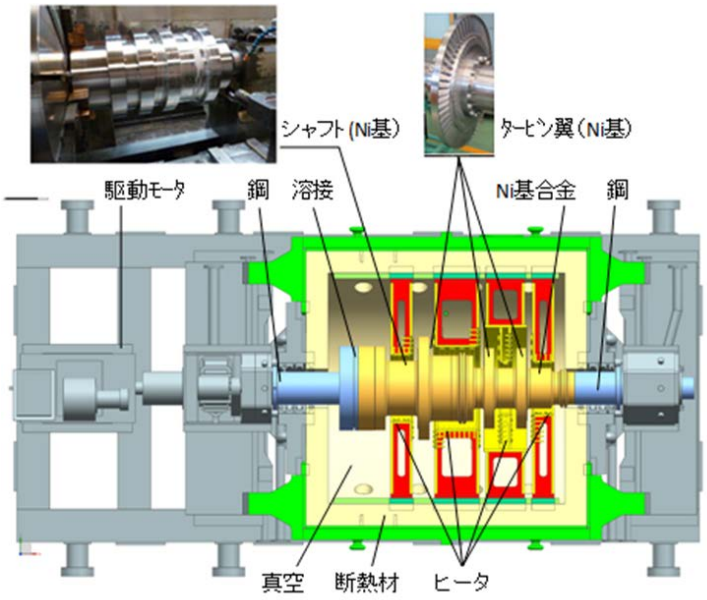


図 3-17　回転試験装置計画図

注 1：「一部に高い溶接割れ感受性を示す材料があった」
当初ボイラ候補材料である。Alloy617（大径管）を溶接したところ、下図に示すように溶接部の曲げテストにおいて溶接部に割れが生じた。この材料はクリープ強度を上げるために特別に成分調製されたものだった。溶接割れの結果を受けて、再度成分を調整し溶接試験を重ねた結果、割れを生じない材料成分を見出すことができた。

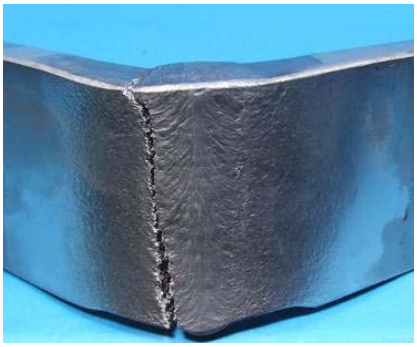


図　注 1-1　曲げ試験で見出された溶接割れ

イットリウム系超電導電力機器技術開発事業に係る困難事例について

１．東日本大震災後の計画停電や節電要請により、企業における電力使用が工場の操業に優先的に振り向けられ、真空装置を用いる超電導線材の開発とケーブル等の機器用線材の試作は、数か月単位での遅延が懸念された。

この困難に際して、ＮＥＤＯとＰＬが相談して、高性能化研究を予定していた研究開発法人の設備と人材を機器用試作に振り向けることを決断。

これにより、機器用の試作は１か月程度の遅れで済み、最終的に当初のプロジェクト期間内に最終目標を達成した。

２．東日本大震災後の電力分野を取り巻く環境の激変により、当初想定していた本プロジェクト終了後の、ユーザーである電力会社と共同した長期信頼性等の開発検証の実施が見通せない状況となった。

この困難に際して、ＮＥＤＯの提案に対して電力基盤整備課様に御理解を得て、海外も含む新たな適用性検討調査を追加的に実施。

本活動を通じて具体的な導入可能性を明確化すると共に、新たな適用方法では、海外の電力会社等からも高い関心を得ることができた。

失敗事例や困難事例

次世代型双方向通信出力制御実証事業

１．共通仕様について

通信機能付 PCS の開発にあたっては、各法人が各社独自の通信仕様・通信インターフェースを採用した開発済みの PCS を活用することとしていたため、上位のサーバとの双方向通信接続を可能とする「PCS-通信アダプタ」間の共通仕様を取りまとめる必要性が出てきた。このため関係法人で議論し、「PCS-通信アダプタ」間での共通的な電文を作成することとした。その際、家庭用 PCS と産業用 PCS では機能が大きく異なるため、それぞれについて電文を取り決めた。

通信インターフェースについては「RS-485」、「Ethernet」の２種類を採用することでほぼすべての PCS に対応することとした。

また、各社にて共通仕様を取りまとめる際、出力制御の考え方や設計手法の違い等があり、相当の議論が必要であった。共通仕様の取りまとめにあたっては、国際標準等の設計手法やスキルを身につけていることが望ましい。

なお、策定した共通仕様に基づき PCS を開発したが、各法人において仕様の解釈に相違があり多くの不具合が発生し、仕様の見直しを行う必要があった。

２．機器開発について

PCS は上位システムから出力制限を要求されると配電系統への出力を制限する制御を行うが、出力制御中に日射量が急激に変化した場合、制御に遅れが生じ、要求された出力制限を越えて発電することがある。例えば 50%に出力を制御していても、日射量が急激に増えると、短時間ではあるが、制御遅れの時間（秒単位）内には 50%を超えて発電する。実用に向けては、出力制限を越えて発電する電力の取り扱いや考え方を定義する必要がある。

また、効果的に実証を行うために、上位のサーバと通信アダプタ間の時刻同期は必須要件としていたが、通信アダプタが通信ネットワークから切り離されていることから、時刻同期のズレが発生した。この対応として、簡易的に導入できる携帯電話子局装置を用いて、保守回線として活用するとともに秒単位での制御を実現し、実証を円滑に、効率的に行う上で有用な方策を見出した。

920MHz 帯特定小電力無線については、法改正により実証期間中の 2012 年 7 月より利用が可能となったが、円滑にフィールド試験に移行するため、事前に実験局免許を取得し、限られたエリアで評価実験を行った。

３．フィールド試験について

青森フィールドでは、約 120 世帯にご協力いただき居住環境での実証試験を実施しているが、住民の方々の負担を極力減らすために、事前に路上等で通信確認を実施し、住居への立ち入り回数を最小限に抑えた。また、計測開始後は、住居内に設置した無線機の環境変化を把握することが困難であるため、計測結果の妥当性について判断が難しいケースもあった。PLC の実証試験にあたっては、装置を屋外に設置する必要があるため、前年に積雪の状況を現地で確認したうえで、設置場所を選定し、装置が雪に埋もれない高さにする等、積雪に対応できる構造にした。

他の実証フィールドでは、PV システムの計測データのある時間帯に発電量が減少している事象がみられた。現地確認の結果、周囲にある電柱の陰となることが判明したことから、電柱を移設した。

実証試験前の動作確認において、当初の想定通りに無線装置が動作しない事例があった。この対応として、試験結果の集計方法を変更する必要性が生じたため、予定以上の作業日数を要した。動作検証には、十分余裕を持ったスケジュールを組むことが望ましい。

失敗事例や困難事例

太陽光発電出力予測技術開発実証事業

図 6-1 のように、晴天から急に曇り、ＰＶ出力が急減するような場合には、その変化に応じて火力発電機などの出力を増やすことで、需要と供給のバランスを保たなければならない。しかし、新たに火力機を運転する場合は、発電までに時間がかかる。ＰＶ出力の急激な変化を予測することができれば、予め運転する発電機を準備することができ、より安定的な需給運用が可能となる。

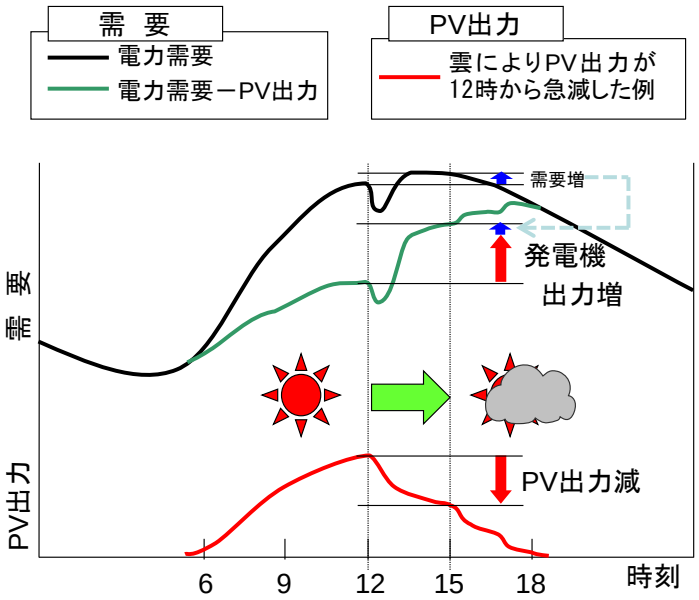


図 6-1　ＰＶ出力の変化に伴う需給運用への影響

ＰＶ出力の急激な変化を予測するためには、図 6-2 に示す①～③のポイントが重要となる。

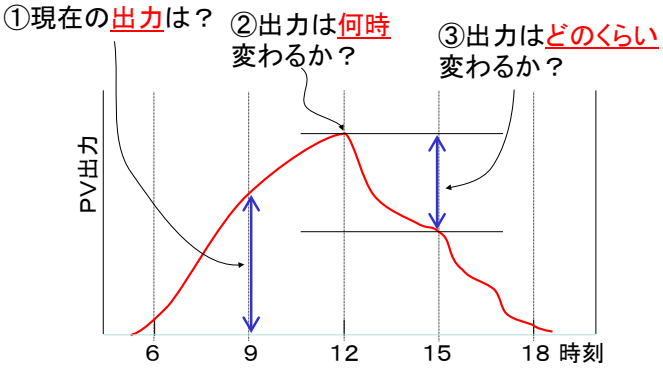


図 6-2　電力需給におけるＰＶ出力変化予測のポイント

図 6-2 の「②出力は何時変わるか？」については、ＰＶ出力の増加・減少に合わせて、停止や起動および出力を調整する発電機の選択ができるよう、ＰＶ出力が変化するタイミングを把握したかったが、図 6-3 に示す予測事例のようにか

なり難しいことが判明した。

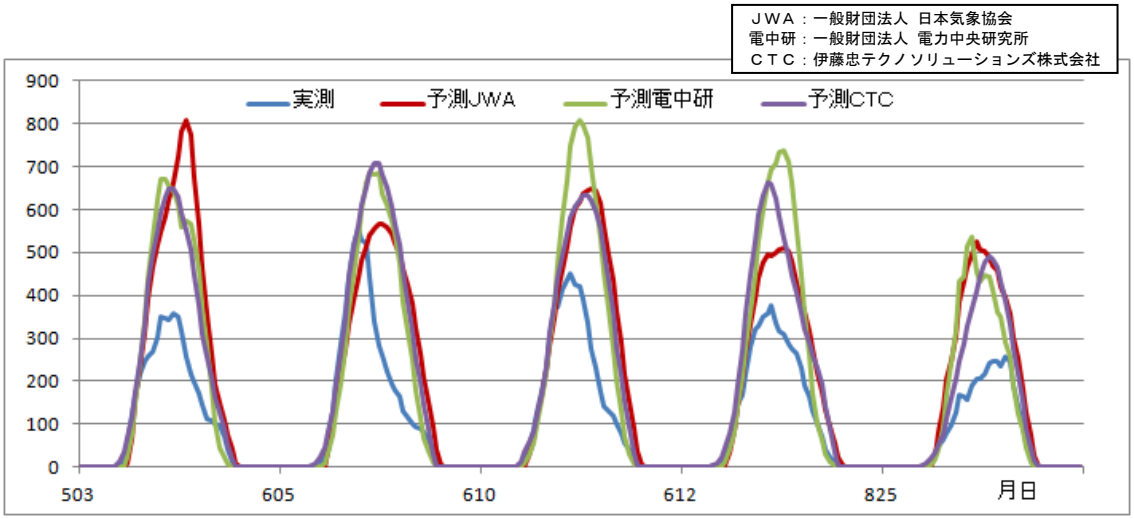


図 6-3　日射予測結果と実測値の比較（予測誤差が大きい日）

そのため、図 6-2 の②のような変化するタイミングを評価することに力点を置くより、各時刻の予測精度を上げることに注力することとし、日射量の予測（課題⑧－４、⑧－５、⑧－６）に取り組んだ。

さらに、予測精度を補完する情報として、図 6-4 のように日射量予測の信頼区間（誤差幅）に関する情報（図 6-4 の「95%信頼区間」「60%信頼区間」のような予測が当たる確率）の検討を進めることとした。

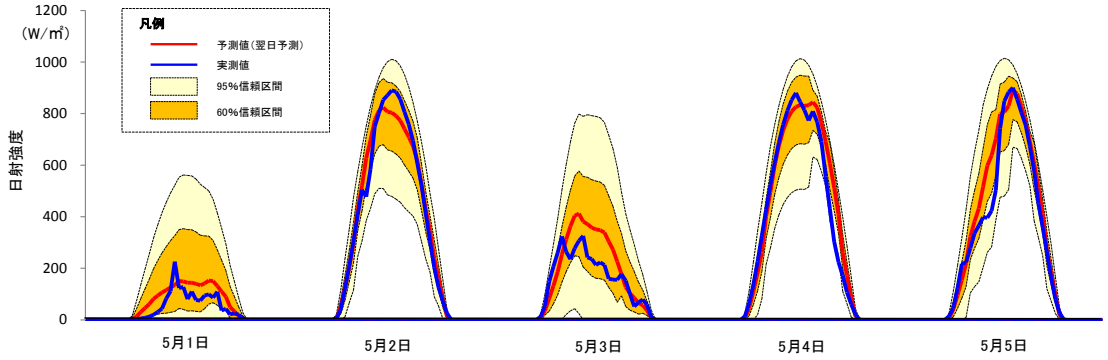


図 6-4　信頼区間予測の例

参考資料３

今後の研究開発の方向等に関する提言に対する対処方針

次世代電力供給システムに係る技術に関する施策（中間）

今後の研究開発の方向等に関する提言	提言に対する対処方針
○今後も地球温暖化対策に資する技術（再生可能エネルギーの導入促進、効率改善）を推進すべき。	○火力発電の高効率化及び電力の安定供給のための技術開発については、エネルギーセキュリティ及び地球温暖化対策の観点からこれらを解決するための重要な取組と認識している。
○火力発電技術開発と送配電技術開発については、施策の目的と位置付けは明確に示されており、今後も継続的な研究・開発を行って行く必要がある。特に火力発電技術は、1700℃級ガスタービンの開発やAHAT（Advanced Humid Air Turbine：高湿分空気利用ガスタービン）が、例えば石炭ガス化技術IGCCの事業化を推し進める役割を果たすように、様々な個別技術を統合・連携する施策が必要である。このためにも国が積極的に関与・支援して、エネルギー対策を推し進めるべきであり、それにより、各企業や大学の研究レベルも向上し、ひいては我が国の技術レベルの底上げが期待される。	○火力発電技術開発及び送配電技術開発については、エネルギーを取り巻く環境に配慮し、また、様々な個別技術の統合、連携を考慮しつつ、時宜にかなった研究開発を今後とも継続的に実施していく。
○優位性のある国産技術の海外展開に資する最先端の技術開発分野に優先的に取り組むべき。例えば、本年度の主な対象事業にもなっている高効率発電は、我が国の企業群が、素材の開発」・製造・加工、部品・部材の設計・製造、プラントの設計・施工・運営、メンテナンス、改良などを一貫体制で実施でき、また、国内での新増設やリプレース需要だけでなく、市場規模が極めて大きい海外での事業展開も期待できるだけに、今後も、国が主導して技術開発を推進すべき。	○火力発電技術開発及び送配電技術開発については、優位性のある国産技術の海外展開に資する最先端の技術開発を視野に入れた技術開発を推進していく。
○日本のビームやレーザを使った最新の評価技術を駆使して、材料開発の成果を確かめることができる。評価することができれば、そこに進歩する方法が見つかる。基礎的な開発はこの評価が大きなコストになるが必要になる。機械工学、電気工学、情報工学などの大きな進歩が総合的に組み合わされて大きな進歩になる。その分野の専門家ばかりでなく、異分野との交流が思わぬ発展のもととなる。	○事業成果の評価に当たっては、最新の評価技術についても考慮に入れ、実施していく。また、火力発電技術開発及び送配電技術開発に当たっては、様々な分野からの参加も考慮に入れ、実施していく。

1700℃級ガスタービン実証事業（中間）

今後の研究開発の方向等に関する提言

○タービンなどの寿命がメンテナンスコストを決めるので効率ばかり追わないで総合的に捉える必要がある。オリジナルな技術が１つでも必要である。国際標準化戦略で差を付ける。そして、国際プロジェクト化して日本がリーダーとなることが重要。

提言に対する対処方針

○1600℃級ガスタービンの運用実績を反映することによって、タービンなどの寿命を確保と効率向上の両立を図る。

○13項目の要素技術開発を通じて、ガスタービン全体の総合的な性能向上を図る。

○送電端効率57%HHVを狙う複合発電設備として世界初の実用化を図ると共に、知財の海外出願を多数実施することにより、国際標準化を図る。

○実証後、国際市場での速やかな上市を図る。

次世代型双方向通信出力制御実証事業（中間）

今後の研究開発の方向等に関する提言	提言に対する対処方針
○産学官の様々な実施者によるオープンイノベーションの促進、公的資金による研究の成果は公共財であるとの認識による成果・データに対するオープンアクセスの提供などの実現を期待する。	○産学官による本事業の体制において、引き続き活発な議論を進めていく。 ○本事業における研究成果の共有化を実現するため、研究成果・データをまとめた報告書の公表に対する検討に取り組んで行く。

太陽光発電出力予測技術開発実証事業（中間）

今後の研究開発の方向等に関する提言	提言に対する対処方針
○産学官の様々な実施者によるオープンイノベーションの促進、公的資金による研究の成果は公共財であるとの認識による成果・データに対するオープンアクセスの提供などの実現を期待する。	○引き続き、全法人参加による研究体制を組織し、事業の成果の検証を予定している。 ○事業の成果やデータの提供については、公共の利益となるよう対応していく。

参考資料４　経済産業省技術評価指針

経済産業省技術評価指針

平成２１年３月３１日

目次

経済産業省技術評価指針の位置付け　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　1
Ⅰ．評価の基本的考え方　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4
　１．評価目的　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4
　２．評価の基本理念　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　4
　３．指針の適用範囲　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5
　４．評価の類型・階層構造及びリンケージ　・・・・・・・・・・・・・・・・・　5
　５．評価方法等　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　5
　６．評価結果の取扱い等　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　6
　７．評価システムの不断の見直し　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7
　８．評価体制の充実　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7
　９．評価データベース等の整備　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7
　10．評価における留意事項　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　7
Ⅱ．評価の類型と実施方法　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　9
　Ⅱ．１．技術に関する施策評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　9
　　(1) 事前評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　9
　　(2) 中間・終了時評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・　9
　Ⅱ．２．技術に関する事業評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０
　　Ⅱ．２．１．研究開発制度評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０
　　(1) 事前評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０
　　(2) 中間・終了時評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１０
　　Ⅱ．２．２．プロジェクト評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１
　　(1) 事前評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１
　　(2) 中間・終了時評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１１
　　Ⅱ．２．３．競争的資金制度による研究課題に関する評価　・・・・・・・・・１２
　　(1) 事前評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１２
　　(2) 中間・終了時評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１３
　Ⅱ．３．追跡評価　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・１４

経済産業省技術評価指針の位置付け

経済産業省技術評価指針（以下、「本指針」という。）は、経済産業省が、経済産業省における技術に関する施策及び技術に関する事業（以下、「技術に関する施策・事業」という。）の評価を行うに当たって配慮しなければならない事項を取りまとめたガイドラインである。

本指針は、「産業技術力強化法」（平成１２年法律第４４号）第１０条の規定、「科学技術基本計画」（平成１８年３月閣議決定）、「研究開発システムの改革の推進等による研究開発能力の強化及び研究開発等の効率的推進等に関する法律」（平成２０年法律第６３号）第３４条の規定及び「国の研究開発評価に関する大綱的指針」（平成２０年１０月内閣総理大臣決定）（以下、「大綱的指針」という。）に沿った適切な評価を遂行するための方法を示す。

同時に、「行政機関が行う政策の評価に関する法律」（平成１３年法律第８６号）（以下、「政策評価法」という。）に基づく「経済産業省政策評価基本計画」（以下、「政策評価基本計画」という。）に沿った、経済産業省政策評価のうち研究開発に関する部分の実施要領としての性格を持つ。したがって、技術に関する施策・事業についての評価の結果は、政策評価基本計画に基づき実施される事前評価及び事後評価に適切に反映・活用を図る。

技術評価は、政策評価法上要請される評価を含め政策評価の一環としての位置付けを有することから、本指針は、技術に関する施策・事業の成果や実績等を厳正に評価し、それを後の技術に関する施策・事業の企画立案等に反映させる政策サイクルの一角としての評価の在り方について定めるものである。

ただし、技術に関する施策・事業に係る評価は、競争的資金制度による研究課題、プロジェクトといった研究開発の内容や性格、実施体制等の態様に応じた評価方法に拠るべきであるとともに、評価の厳正さと効率性を両立するためには、評価をとりまく様々な状況に応じた臨機応変な評価手順を設定する必要がある。さらに、評価手法は日進月歩であり、今後よりよい評価手法が提案されることも十分考えられる。したがって、本指針では共通的なルール及び配慮事項を取り上げることとし、より詳細な実施のプロトコルは評価マニュアルの作成等により記述することで、機動的な実施を図ることとする。

研究開発機関が自ら実施する評価をその機関の自己改革の契機とするような自律的なシステムの構築に努め、研究開発を実施する独立行政法人が、大綱的指針及び本指針に沿って、研究開発評価の実施に関する事項について、明確なルールを定め、研究開発評価の実施及び評価結果の活用が適切かつ責任を持って行われるよう、所管官庁としての責務を果たすものとする。

◎本指針における用語については、次に定めるところによる。

・競争的資金制度：資金を配分する主体が、広く一般の研究者（研究開発に従事している者又はそれらの者から構成されるグループをいう。）、企業等又は特定の研究者、企業等を対象に、特定の研究開発領域を定め、又は特定の研究開発領域を定めずに研究課題を募り、研究者、企業等から提案された研究課題の中から、当該課題が属する分野の専門家（当該分野での研究開発に従事した経験を有する者をいう。）を含む複数の者による、研究開発の着想の独創性、研究開発成果の先導性、研究開発手法の斬新性その他の科学的・技術評価又は経済的・社会的評価に基づき、実施する課題を採択し、当該課題の研究開発を実施する研究者等又は研究者等が属する組織若しくは企業等に資金を配分する制度をいう。
・研究開発制度：資源配分主体が研究課題を募り、提案された課題の中から採択した課題に研究開発資金を配分する制度をいう。
・プロジェクト：具体的に研究開発を行う個別の実施単位であり、明確な目的や目標に沿って実施されるものをいう。研究開発制度（競争的資金制度を含む）による研究課題は、本指針上プロジェクトには該当しない。
・研究開発機関：国からの出資、補助等の交付を受けて研究開発を実施し、又は研究開発の運営管理を行う機関をいう。
・技術に関する事業：具体的に研究開発を行う個別の実施単位をいい、「研究開発制度（競争的資金制度を含む）」、「プロジェクト」及び「競争的資金制度による研究課題」により構成される。
・技術に関する施策：同一又は類似の目的を有する技術に関する事業のまとまりをいい、当該目的との関係で必要な研究開発以外の要素（調査等）を含む場合がある。
・政策評価書：本指針において用いる「政策評価書」とは経済産業省政策評価実施要領を踏まえた評価書をいう。
・政策サイクル：政策の企画立案・実施・評価・改善（plan-do-check-action）の循環過程をいう。
・評価システム：評価目的、評価時期、評価対象、評価方法等、評価に係るあらゆる概念、要素を包含した評価制度、体制の全体をいう。
・推進課：技術に関する事業を推進する課室（研究開発担当課室）をいう。推進課は、評価結果を反映させるよう努力する義務がある。
・主管課：技術に関する施策の企画立案を主管する課室及び予算等の要求事項を主管する課室をいう。
・査定課：予算等の査定を行う課室（大臣官房会計課、資源エネルギー庁総合政策課等）をいう。
・有識者等：評価対象となる技術に関する施策・事業について知見を有する者及び研究開発成果の経済的・社会的意義につき指摘できる人材（マスコミ、ユーザ、人文・社会科学者、投資家等）をいう。
・外部評価者：経済産業省に属さない外部の有識者等であって、評価対象となる技術に関する施策・事業の推進に携わっていない者をいう。
・外部評価：外部評価者による評価をいい、評価コメントのとりまとめ方法としてパネルレビュー

（評価者からなる委員会を設置（インターネット等を利用した電子会議を含む。）して評価を行う形態）による場合とメールレビュー（評価者に対して郵便・ＦＡＸ・電子メール等の手段を利用して情報を提供し、評価を行う形態）による場合とがある。

・評価事務局：技術に関する施策・事業の評価の事務局となる部署をいい、評価者の行う評価の取りまとめ責任を負う。

・評価者：評価の責任主体をいい、パネルレビューによる場合には外部評価者からなる委員会が責任主体となる。また、評価の結果を踏まえて、資源配分の停止や変更、技術に関する施策・事業の内容の変更に責任を有するのは企画立案部門である技術に関する施策・事業の推進課及び主管課である。

・終了時評価：事業終了時に行う評価であり、事業が終了する前の適切な時期に行う終了前評価と事業の終了直後に行う事後評価がある。

Ⅰ．評価の基本的考え方

１．評価目的

(1) より良い政策・施策への反映

評価を適切かつ公正に行うことにより、研究者の創造性が十分に発揮されるような、柔軟かつ競争的で開かれた研究開発環境の創出など、より良い政策・施策の形成等につなげること。

(2) より効率的・効果的な研究開発の実施

評価を支援的に行うことにより、研究開発の前進や質の向上、独創的で有望な優れた研究開発や研究者の発掘、研究者の意欲の向上など、研究開発を効果的・効率的に推進すること。

(3) 国民への技術に関する施策・事業の開示

高度かつ専門的な内容を含む技術に関する施策・事業の意義や内容について、一般国民にわかりやすく開示すること。

(4) 資源の重点的・効率的配分への反映

評価の結果を技術に関する施策・事業の継続、拡大・縮小・中止など資源の配分へ反映させることにより資源の重点化及び効率化を促進すること。また、研究開発をその評価の結果に基づく適切な資源配分等通じて次の段階に連続してつなげることなどにより、研究開発成果の国民・社会への還元の効率化・迅速化に資すること。

２．評価の基本理念

評価の実施に当たっては、以下の考え方を基本理念とする。

(1) 透明性の確保

推進課、主管課及び研究開発機関においては、積極的に成果を公開し、その内容について広く有識者等の意見を聴くこと。評価事務局においては、透明で公正な評価システムの形成、定着を図るため、評価手続、評価項目・評価基準を含めた評価システム全般についてあらかじめ明確に定め、これを公開することにより、評価システム自体を誰にも分かるものとするとともに、評価結果のみならず評価の過程についても可能な限り公開すること。

(2) 中立性の確保

評価を行う場合には、被評価者に直接利害を有しない中立的な者である外部評価の導入等により、中立性の確保に努めること。

(3) 継続性の確保

技術に関する施策・事業においては、個々の評価がそれ自体意義を持つだけではなく、評価とそれを反映した技術に関する施策・事業の推進というプロセスを繰り返していく時系列のつながりにも意義がある。したがって、推進課及び主管課にとって評価結果を後の技術に関する施策・事業の企画立案等に反映させる際に有用な知見を抽出し、継続性のある評価方法で評価を行うこと。

(4) 実効性の確保

政策目的に照らし、効果的な技術に関する施策・事業が行われているか判断するための効率的評価が行われるよう、明確で実効性のある評価システムを確立・維持するとともに、技術に関する施策・事業の運営に支障が生じたり、評価者及び被評価者双方に過重な負担をかけるこ

とのない費用対効果の高い評価を行うこと。

３．指針の適用範囲

(1) 本指針においては、多面的・階層的な評価を行う観点から、経済産業省における具体的に研究開発を行う個別の実施単位である研究開発制度、プロジェクト及び競争的資金制度による研究課題である技術に関する事業並びに同一又は類似の目的を有する技術に関する事業のまとまりである技術に関する施策を評価対象とする。

(2) 国費の支出を受けて技術に関する事業を実施する民間機関、公設試験研究機関等の評価については、当該事業の評価の際等に、これら機関における当該事業の研究開発体制に関わる運営面に関し、国費の効果的・効率的執行を確保する観点から、必要な範囲で評価を行う。

(3) 上記(2)の規定にかかわらず、独立行政法人が運営費交付金により自ら実施し、又は運営管理する技術に関する事業については、独立行政法人通則法（平成１１年法律第１０３号）及び大綱的指針に基づいて実施されるものであり、本指針の対象としない。なお、技術に関する施策には、これら事業は含まれるものとする。

(4) 評価の種類としてはこの他に研究者等の業績の評価が存在するが、これは研究開発機関の長が評価のためのルールを整備した上で、責任を持って実施することが基本であり、本指針の対象としない。

４．評価の類型・階層構造及びリンケージ

(1) 実施時期による類型

評価はその実施時期により、事前評価、中間・終了時評価及び追跡評価に類型化される。

(2) 評価の階層構造

経済産業省における技術評価では、技術に関する施策・事業での評価を基本的な評価単位とするが、政策効果をあげるために、特に必要があると認められるときには、関連する複数の技術に関する施策・事業が有機的に連携をとって

体系的に政策効果をあげているかを評価することとする（これは経済産業省政策評価実施要領における「政策体系評価」に対応するものと位置付ける。）。

(3) 実施時期による評価のリンケージ

中間・終了時評価は、技術に関する施策・事業の達成状況や社会経済情勢の変化を判断し、計画の見直しや後継事業への展開等の是非を判断するものである。また、事前評価での予想が実際にどのような結果となったか、予算措置は妥当であったか等を確認することにより、事前評価の方法を検証し得るものである。したがって、中間・終了時評価の結果をその後の産業技術政策・戦略の企画立案や、より効果的な事前評価の評価手法の確立に反映させるよう努めるものとする。

また、中間・終了時評価の結果は、追跡評価にて検証されるものである。

５．評価方法等

厳正な評価を行うためには、評価方法、評価項目等に客観性を持たせることが必要であること

から、本指針をはじめ評価実施に係る諸規程等を整備の上、公開するものとする。

技術評価室は本指針を踏まえ、評価マニュアル等を策定するとともに、円滑な評価の実施のための指導及び評価システムの維持管理を行う。

(1) 施策原簿

技術に関する施策の基本実施計画書、政策評価書等をもって施策原簿とする。施策原簿を作成・改定した場合は、速やかにその写しを技術評価室へ提出する。

(2) 事業原簿

技術に関する事業の基本実施計画書、政策評価書等をもって事業原簿とする。研究開発制度及びプロジェクトの事業原簿を作成・改定した場合は、速やかにその写しを技術評価室へ提出する。

(3) 評価項目・評価基準

評価の類型及び技術に関する施策・事業の態様等に応じて標準的な評価項目・評価基準を技術評価室が別に定めることとする。

(4) 評価手続・評価手法

評価の類型に応じて適切な評価手法を用いるものとする。なお、複数の事業間の相対的評価を行う場合等においては、評点法の活用が有効と考えられ、評価の類型及び対象案件の態様に応じ適宜活用することが望ましい。

(5) 評価の簡略化

評価の実施に当たっては、評価コストや被評価者側の過重な負担を回避するため、評価対象となる事業に係る予算額が比較的少額である場合には、評価項目を限定する等の簡略化を行うことができるものとする。なお、簡略化の標準的な方法については技術評価室が別に定める。

６．評価結果の取扱い等

(1) 評価結果の取扱い

評価事務局は、評価終了後速やかに評価書の写しを技術評価室に提出する。技術評価室は全ての評価結果について、これまでに実施された関連調査及び評価の結果、評価の実施状況等を踏まえつつ意見をまとめ、査定課、秘書課及び政策評価広報課に報告することができる。

(2) 予算査定との関係

査定課は、技術評価室から事前評価及び中間評価の評価書の提出を受けた場合は、技術評価室の意見を踏まえつつ技術に関する施策・事業の評価等を行う。事前評価に関しては査定課の評価を終えた事前評価書に記載された技術に関する施策・事業の内容をもって、推進課又は主管課と査定課との間の合意事項とみなし、査定課はこれを踏まえて予算査定を行う。中間評価に関しては、査定課は中間評価結果を踏まえて予算査定を行う。

(3) 評価結果等の公開の在り方

評価結果及びこれに基づいて講ずる又は講じた措置については、機密の保持が必要な場合を除き、個人情報や企業秘密の保護、知的財産権の取得等に配慮しつつ、一般に公開することとする。なお、事前評価については、政策立案過程の透明化を図る観点から、評価事務局は予算が経済産業省の案として確定した後に、公開するものとする。パネルレビューを行う場合にお

ける議事録の公開、委員会の公開等については、「審議会等の透明化、見直し等について」（平成７年９月閣議決定）に準じて行うものとする。

７．評価システムの不断の見直し

いかなる評価システムにおいても、評価は評価者の主観的判断によってなされるものであり、その限りにおいては、完璧な客観性、公平性を求めることは困難である。したがって、評価作業が終了するたびごとにその評価方法を点検し、より精度の高いものとしていく努力が必要である。また、本指針については、こうした一連の作業を踏まえ、原則として毎年度見直しの要否を検討する。

８．評価体制の充実

評価体制の充実を図るため、研究者の評価者としての活用などにより評価業務に携わる人材を育成・確保するとともに、研究開発費の一部を評価費用に充てるなど評価に必要な資源を確保する。

９．評価データベース等の整備

技術評価室は、国内外の適切な評価者を選任できるようにするため、及び個々の評価において普遍性・信頼性の高い評価を実現するため、個々の技術に関する施策・事業についての研究者、資金、成果、評価者、評価結果等をまとめたデータベースを整備する。

また、競争的資金制度による研究課題に関する評価など、審査業務等を高度化・効率化するために必要な電子システムの導入も促進する。

１０．評価における留意事項

(1) 評価者と被評価者との対等性

① 評価者と被評価者との関係

評価作業を効果的に機能させるためには、評価者と被評価者の双方が積極的にその知見と情報を提供し合うという協調的関係と、評価者もその評価能力を評価されるという意味で評価者と被評価者とが相互に相手を評価するという緊張関係とを構築し、この中で、討論を行い、評価を確定していく必要がある。

この際、評価者は、不十分な成果等被評価者が自ら進んで提示しない事実があるかどうかを見極める能力が要求される。一方、被評価者は、評価対象の技術に関する施策・事業の位置付けを明確に認識するとともに、評価結果を正確に理解し、確実にその後の技術に関する施策・事業の創設、運営等に反映させていくものとする。

② 評価者に係る留意事項

研究者が評価者となる場合、評価者は、評価作業を評価者自らの研究を妨げるものとして捉えるべきではなく、自らの研究の刺激になる行為として、積極的に取り組むことが必要である。

また、研究開発成果を、イノベーションを通じて国民・社会に迅速に還元していく観点から、産業界の専門家等を積極的に評価者に選任する。

③ 被評価者に係る留意事項

被評価者は、評価を事業の質をより高めるものとして積極的に捉え、評価は評価者と被評価者の双方の共同作業であるとの認識の下、真摯な対応を図ることが必要である。

(2) 評価の不確実性

評価時点では見通し得なかった技術、社会情勢の変化が将来的に発生し得るという点で評価作業は常に不確実性を伴うものである。したがって、評価者は評価の精度の向上には、必然的に限界があることを認識した上で、評価時点で最良と考えられる評価手法をとるよう努めることが必要である。かかる観点からは、厳正さを追求するあまりネガティブな面のみを過度に減点法で評価を行うこととなると、将来大きな発展をもたらす技術を阻害するおそれがある点にも留意する必要がある。

また、成果に係る評価において、目標の達成度合いを評価の判定基準にすることが原則であるが、併せて、副次的成果等、次につながる成果を幅広い視野からとらえる。

(3) その他の留意事項

① 海外の研究者、若手研究者の活用

研究者には、研究開発の発展を図る上で専門的見地からの評価が重要な役割を果たすものであることから、評価者としての評価への積極的参加が求められる。一方、特定の研究者に評価実施の依頼が集中する場合には、評価への参加が大きな負担となり、また、評価者となる幅広い人材の養成確保にもつながらないことから、海外の研究者や若手研究者も評価者として積極的に参加させることなどにより評価者確保の対象について裾野の拡大を図るよう努める。

② 所期の成果を上げられなかった研究開発

研究開発は必ずしも成功するとは限らず、また、失敗から貴重な教訓が得られることもある。したがって、失敗した場合には、まずその原因を究明し、今後の研究開発にこれを生かすことが重要であり、成果を上げられなかったことをもって短絡的に従事した研究者や組織、機関を否定的に評価すべきものではない。また、評価が野心的な研究開発の実施の阻害要因とならないよう留意しなければならない。

③ 数値的指標の活用

論文の被引用度数、特許の申請状況等による成果の定量的評価は一定の客観性を有するが、技術に関する施策・事業においては研究分野や内容により、その意味は大きく異なり得るものであり、必ずしも研究開発成果の価値を一義的に表すものではない。したがって、これらを参考資料として有効に活用しつつも、偏重しないよう留意すべきである。

④ 評価結果の制度間での相互活用

研究開発をその評価の結果に基づく適切な資源配分等を通じて次の段階の研究開発に連続してつなげるなどの観点から、関係府省、研究開発機関及び制度を越えて相互活用するよう努める。

⑤ 自己点検の活用

評価への被評価者等の主体的な取組を促進し、また、評価の効率的な実施を推進するため、推進課及び主管課は、自ら技術に関する施策・事業の計画段階において具体的かつ明確な目標とその達成状況の判定基準等を明示し、技術に関する施策・事業の開始後には目標の達成状況、

今後の発展見込み等の自己点検を行い、評価者はその内容の確認などを行うことにより評価を行う。

⑥ 評価の国際的な水準の向上

研究開発の国際化への対応に伴い、評価者として海外の専門家を参加させる、評価項目に国際的なベンチマーク等を積極的に取り入れるなど評価に関して、実施体制や実施方法などの全般にわたり、評価が国際的にも高い水準で実施されるよう取り組む。

Ⅱ．評価の類型と実施方法

Ⅱ．１．技術に関する施策評価

技術に関する施策の評価は、当該技術分野全体の方向性等を勘案しつつ、当該施策の下に位置付けられる技術に関する事業のまとまりを俯瞰する形で、各事業の相互関係等に着目し、個々の事業に係る評価結果を踏まえて行う。

(1)事前評価

新規の技術に関する施策の創設に当たって行う。

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手続・評価手法

外部評価を行う。

評価対象とする技術に関する施策は、技術評価室が推進課及び主管課と協議の上、定める。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

(2) 中間・終了時評価

技術に関する施策創設後、一定期間継続的に実施しているものについて、技術に関する施策ごとに中間・終了時評価を行う。

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び主管課

③ 評価事務局

推進課及び主管課。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手続・評価手法

施策原簿、成果報告、運営状況報告等を基に外部評価を行う。

評価対象とする技術に関する施策は、技術評価室が推進課及び主管課と協議の上、定める。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

中間評価については、実施が４年以上にわたる又は実施期間の定めのない技術に関する施策について３年程度ごとに定期的に行う。なお、モニタリング（進捗状況を把握する作業）については毎年行うこととする。

終了時評価については、当該技術に関する施策の成果を切れ目なく次の技術に関する施策につなげていく場合には、当該技術に関する施策が終了する前の適切な時期に終了前評価を行うこととし、その他の場合には、当該技術に関する施策の終了直後に事後評価を行うものとする。

なお、中間・終了時評価は、効果的・効率的な評価の実施の観点から、技術に関する施策を構成する技術に関する事業の評価を前提として実施する。

Ⅱ．２．技術に関する事業評価

Ⅱ．２．１．研究開発制度評価

研究開発制度評価は、個々にその目的・政策的位置付け、目標、成果、目標の達成度、必要性、効率性、有効性等について、事前評価及び中間・終了時評価を行う。

(1) 事前評価

新規の研究開発制度の創設に当たって行う。

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課

③ 評価事務局

推進課

④ 評価手続・評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。研究開発制度について制度実施予定期間及び中間評価の時期の妥当性に関して評価する。

(2) 中間・終了時評価

研究開発制度創設後、一定期間継続的に実施しているものについて、研究開発制度ごとに中間・終了時評価を行う。

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課及び研究開発機関

③ 評価事務局

推進課又は研究開発機関（独立行政法人であって、研究開発制度の推進部門から独立した評価部門が評価を行う場合に限る。）。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手続・評価手法

事業原簿、研究開発制度から得られた成果、研究開発制度の運営状況等を基に外部評価を行う。また、必要に応じ、評点法の活用による評価の定量化を行うこととする。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

中間評価については、実施期間が５年以上の研究開発制度又は実施期間の定めのない研究開発制度については、その目的、内容、性格、規模等を考慮し、３年程度ごとに定期的に行う。なお、モニタリング（進捗状況を把握する作業）については毎年行うこととする。

終了時評価については、当該研究開発制度の成果を切れ目なく次の研究開発制度につなげていく場合には、当該研究開発制度が終了する前の適切な時期に終了前評価を行うこととし、その他の場合には、当該研究開発制度終了直後に事後評価を行うものとする。

なお、中間・終了時評価は、効果的・効率的な評価の実施の観点から研究開発制度に関する評価結果の情報を集積し、関連する技術に関する施策の評価に際しその情報を提供する。

Ⅱ．２．２．プロジェクト評価

プロジェクト評価は、個々にその目的・政策的位置付け、目標、成果、有効性、効率性等について評価を行う。事前評価及び中間・終了時評価を行う。

(1) 事前評価

新規のプロジェクトの創設に当たって行う。

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課

③ 評価事務局

推進課

④ 評価手続・評価手法

外部評価を行う。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。プロジェクトについて実施予定期間及び中間評価の時期の妥当性に関して評価する。

(2) 中間・終了時評価

プロジェクト創設後、一定期間継続的に実施しているものについて、プロジェクトごとに中間・終了時評価を行う。

① 評価者

外部評価者

② 被評価者

推進課、研究開発機関及び実施者（研究開発機関から委託又は補助を受けてプロジェクトを実施する機関又は個人をいう。）

③ 評価事務局

推進課又は研究開発機関（独立行政法人であって、事業の推進部門から独立した評価部門が評価を行う場合に限る。）。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手続・評価手法

事業原簿、成果報告、運営状況報告等を基に外部評価を行う。また、必要に応じ、評点法の活用による評価の定量化を行うこととする。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

中間評価は、実施期間が５年以上のプロジェクト又は実施期間の定めのないプロジェクトについては、その目的、内容、性格、規模等を考慮し、３年程度ごとに定期的に行う。なお、モニタリング（進捗状況を把握する作業）については毎年行うこととする。

終了時評価は、当該プロジェクトの成果を切れ目なく次のプロジェクトにつなげていく場合には、当該プロジェクトが終了する前の適切な時期に終了前評価を行うこととし、その他の場合には、当該プロジェクト終了直後に事後評価を行うものとする。

なお、中間・終了時評価は、効果的・効率的な評価の実施の観点から個別プロジェクトに関する評価結果の情報を集積し、関連する技術に関する施策の評価に際しその情報を提供する。

Ⅱ．２．３．競争的資金制度による研究課題に関する評価

競争的資金制度に提案された個々の研究課題について、当該競争的資金制度の目的に照らして、目標・計画、科学的・技術的意義、実施体制、実用化の見通し等について評価を行う。複数の候補の中から優れた研究課題を採択するための事前評価及び目標の達成状況や成果の内容等を把握するための中間・終了時評価を行う。

(1) 事前評価

新規研究課題の採択時に行う。

① 評価者

外部評価者。

研究課題の採択の際、被評価者と同じ研究開発機関に所属する等の専門家は排除する必要があるため、例えば評価事務局はあらかじめ全評価者名を公表し、被評価者に対して申請時に利害関係者の存在を併せて書面にて宣誓することを求める等の措置を講ずる。また、評価者には秘密保持を義務付ける。

なお、評価者としてふさわしい者であることを示すため、評価者の業績又は実績について適切な時期にホームページ等で公開する。

② 被評価者

研究課題の提案者

③ 評価事務局

推進課又は研究開発機関

④ 評価手続・評価手法

研究課題の採択に当たっては、エフォート（一研究員の全研究活動時間のうち当該競争的資金制度による研究活動に充てる時間の割合をいう。）の明記を原則求める。また、被評価者と利害関係のない有識者等によるパネルレビュー又はメールレビューによる評価を行う。採択に当たっては、他の競争的資金制度による研究課題等との重複が生じないようにする。評価事務局は研究課題の提案者へ不採択の結果を通知する場合には、原則として評価項目別に詳細な評価内容を提示するとともに、不採択となった提案者からの問い合わせに応じるための環境を整備する。

なお、研究課題の評価に際しては、研究分野や当該競争的資金制度の趣旨を踏まえ、必要に応じて、主に業績が十分に定まらない若手研究者等について、マスキング評価の導入を図ることとする。主に中堅以上の研究者に関する研究者としての評価は、所属組織や機関のみに着目するのではなく、過去の実績を充分に考慮した評価とする。

また、研究者の研究遂行能力を示している過去の研究実績について、定量化を試みつつ、研究者としての評価を過去の実績を十分考慮して行った上で研究課題の採否を決定する。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。研究課題について実施予定期間及び中間評価の時期の妥当性に関して評価する。

(2) 中間・終了時評価

研究課題の目標達成度の把握とともに研究課題の継続、拡大・縮小、中止等の資源配分の判断、および必要に応じ被評価者に対する支援的助言を行うための評価。

① 評価者

外部評価者

なお、評価者としてふさわしい者であることを示すため、評価者の業績又は実績について適切な時期にホームページ等で公開する。

② 被評価者

研究課題の実施者

③ 評価事務局

推進課又は研究開発機関。ただし、必要に応じて技術評価室が行うこともできる。

④ 評価手続・評価手法

事業原簿、成果報告、運営状況報告等を基に外部評価を行う。

競争的資金制度による継続的な研究の必要性及びプロジェクトへの発展の可能性（主として技術シーズの創造を目的とする研究の場合に限る。）の有無が判断できる手法により評価を行う。

また、研究課題の終了時評価の結果については、採択された研究課題ごとに定量化されたも

のについては結果を公表する。

⑤ 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

⑥ 実施時期

中間評価については、実施期間が５年以上の研究課題又は実施期間の定めのない研究課題については、その目的、内容、性格、規模等を考慮し、３年程度ごとに定期的に行う。

終了時評価については、当該研究課題の成果を切れ目なく次の研究課題又はプロジェクト等につなげていく場合には、原則、当該研究課題が終了する前の適切な時期に終了前評価を行うこととし、その他の場合には、当該研究課題終了直後に事後評価を行う。

Ⅱ．３．追跡評価

終了して数年経った技術に関する施策・事業を対象に、その研究開発活動や研究開発成果が産業、社会に及ぼした効果について調査し、その調査結果を基に現在の視点から総合的に評価を行う。

(1) 評価者

外部評価者

(2) 被評価者

評価対象となる技術に関する施策・事業及びこれに関連する技術に関する施策・事業に携わった推進課及び研究開発機関

(3) 評価事務局

推進課又は技術評価室

(4) 評価手続・評価手法

過去の事業原簿等の文献データ、関連部署・機関及びその他関係者等からの聞き取り調査等による情報を基にパネルレビュー又は第３者機関への委託による外部評価を行う。また、可能な限り定量的な評価に努める。

(5) 評価項目・評価基準

技術評価室が定める標準的な評価項目・評価基準又は評価者が定めるものとする。

(6) 実施時期

技術に関する施策・事業終了後、成果の産業社会への波及が見極められる時点とする。

参考資料５

経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準

経済産業省技術評価指針に基づく
標準的評価項目・評価基準

平成２５年４月

経済産業省産業技術環境局

技術評価室

目　次

ページ

はじめに ····· 1

Ⅰ．技術に関する施策評価 ····· 3

Ⅱ．技術に関する事業 ····· 6

Ⅱ－１　プロジェクト評価 ····· 6

Ⅱ－２　研究開発制度評価 ····· 9

Ⅱ－３　競争的資金による研究課題に関する評価 ····· 13

Ⅲ．追跡評価 ····· 16

はじめに

研究開発評価に当たっては、公正性、信頼性さらには実効性の観点から、その対象となる研究開発の特性や評価の目的等に応じて、適切な評価項目・評価基準を設定して実施することが必要である。

本標準的評価項目・評価基準は、経済産業省における技術に関する施策及び技術に関する事業の評価を行うに当たって配慮しなければならない事項を取りまとめたガイドラインである経済産業省技術評価指針に基づき、評価方法、評価項目等に一貫性を持たせるために、標準的なものとして、技術評価室が定めるものである。

なお、本標準的評価項目・評価基準は、あくまで原則的なものであり、必ずしも全てそのとおりとしなければならないものではなく、適切な評価の実施のために評価対象によって、適宜、変更することを妨げるものではない。

Ⅰ．施策評価

【事前評価】

１．目的

・施策の目的は特定されていて、簡潔に明示されているか。
・当該施策の導入により、現状をどのように改善し、どのような状況を実現しようとしているのか。

２．必要性

・国（行政）が関与する必要があるか。

（注１）　背景として、どのような問題が当該施策の対象領域等に存在するのか。
また、その問題の所在や程度を数値、データや文献により具体的に把握しているか。

（注２）　行政関与の必要性や妥当性について、その根拠を客観的に明らかにする。
具体的には、妥当性を有することを説明する場合、これらニーズや上位目的に照らした妥当性を可能な限り客観的に明らかにする。また、「市場の失敗」と関連付けて行政の関与の必要性を説明する場合には、「行政関与の基準」の「行政関与の可否に関する基準」により、必要性を明らかにする。

（注３）　行政目的が国民や社会のニーズ又はより上位の行政目的に照らして妥当性を有していること、民間活動のみでは改善できない問題であって、かつ、行政が関与することにより改善できるものが存在することを明らかにする。

３．施策の概要

・施策全体としての概要を適切に記述しているか。
・当該施策を構成する事業を網羅し、個々の事業について記載しているか。

（注）施策の概要の記載において、施策の中間・事後評価時期を記載する。

４．目標、指標及び達成時期

（１）目標

・具体的にいつまでにいかなる事業をどの程度実施し、どの水準から事業を開始し、どの水準の成果を達成するのか。目的と照らして、明確かつ妥当な目標を設定しているか。
・政策の特性などから合理性がある場合には、定性的な目標であっても良いが、その場合、目的として示された方向の上で目指す水準（例えば、研究開発成果による新規市場の創設効果など）が把握できるものとなっているか。

（注）　目標は、資金提供やサービス提供の量といった施策の実施の直接的な結果（アウトプット）だけでなく、施策の目的を具現化した効果（アウトカム：実施の結果、当該施策を直接に利用した者以外にも生ずる効果等）についても設定する。

（２）指標及び目標達成時期

・適切な指標を設定しているか。毎年のモニタリングとして測定可能なものとなっているか。
・当該指標により当該目標の達成度が測定可能なものとなっているか。

・目標達成時期は明確かつ妥当であるか。

（注）＜共通指標＞
・論文数及びそれら論文の被引用度数
・特許等取得した知的所有権数、それらの実施状況
・特に、製品化に際しての実施権供与数、取得実施権料
・国際標準形成への寄与

５．中間・事後評価の時期及び方法

・事前評価書に、中間・事後評価の時期を設定しているか。
・目標達成や運用の状況を、いつ、どのようにして計測し、また、検証するかを明らかにしているか。
・事前評価段階で、評価方法を定めているか。

（注１）施策の中間評価は、技術評価指針に基づき、４年以上の事業期間である施策について、実施する。
なお、技術評価指針における「中間評価」は、政策評価法上においては「事後評価」のカテゴリーに整理される。
（注２）事業の実施状況モニタリングは、過度のコストを伴う等非現実的な実施が前提とならないように配慮し、各指標値を得る情報源及び入手頻度等は明確にする。

６．有識者、ユーザー等の各種意見

・当該施策の企画・立案過程において参照した外部の意見や要請等を施策全体及び個別事業毎に具体的に記述しているか。

７．有効性、効率性等の評価

（１）手段の適正性
・目的や目標を達成するために採り得る政策手段にはどのようなものがあるか。その中で、提案している施策が最も優れていると考える根拠は何か。
・採ろうとする政策手段が目的や目標の達成に役立つ根拠及び程度を明らかにしているか。

（２）効果とコストとの関係に関する分析（効率性）
・要求予算規模、想定減税規模、機会費用その他の当該政策手段に伴い発生するコストを明確にしているか。
・各選択肢についての社会的便益と社会的費用の比較（費用便益分析、費用効果分析、（社会的便益が同等な場合は）コスト分析等）を行っているか。定量的な評価が困難な場合は、少なくとも、各々の想定される結果の長所・短所の定性的な比較に基づいて行っているか。

（３）適切な受益者負担
・政策の目的に照らして、政策の効果の受益や費用の負担が公平に分配されるか。

【中間・事後評価】

１．施策の目的・政策的位置付けの妥当性

（１）施策の目的の妥当性

・施策の目的が波及効果、時期、主体等を含め、具体化されているか。

・技術的課題は整理され、目的に至る具体的目標は立てられているか。

・社会的ニーズに適合し、出口（事業化）を見据えた内容になっているか。

（２）施策の政策的位置付けの妥当性

・施策の政策的位置意義（上位の政策との関連付け、類似施策との関係等）は高いか。

・国際的施策動向に適合しているか。

（３）国の施策としての妥当性、国の関与が必要とされる施策か。

・国として取り組む必要のある施策であり、当省の関与が必要とされる施策か。

・必要に応じ、省庁間連携は組まれているか。

２．施策の構造及び目的実現見通しの妥当性

（１）現時点において得られた成果は妥当か。

（２）施策の目的を実現するために技術に関する事業が適切に配置されているか。

・配置された技術に関する事業は、技術に関する施策の目的を実現させるために必要か。

・配置された技術に関する事業に過不足はないか。

・配置された技術に関する事業の予算配分は妥当か。

・配置された技術に関する事業のスケジュールは妥当か。

３．総合評価

Ⅱ．技術に関する事業評価

Ⅱ－１　プロジェクト評価

【事前評価】

１．事業の必要性及びアウトカムについて（研究開発の定量的目標、社会的課題の解決や国際競争力強化への対応）

（１）事業の必要性はあるか（どのような社会的課題等があるのか）。
（２）アウトカム（目指している社会の姿）の具体的内容及び検証可能なアウトカム指標とその時期は適切に設定されているか。
（３）アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果の程度は優れているものか。
（４）アウトカムに至るまでに達成すべきいくつかの中間段階の目標（技術的成果等）の具体的内容とその時期は適切に設定されているか。

２．アウトカムに至るまでの戦略について

（１）アウトカムに至るまでの戦略に関して、以下の点について適切に計画されているか。
・アウトカムに至るまでのスケジュール
・知財管理の取扱
・実証や国際標準化
・性能や安全性基準の策定
・規制緩和等を含む実用化に向けた取組

（２）成果のユーザーの段階的イメージ・仮説は妥当なものか。
・技術開発成果の直接的受け手は誰か
・社会的インパクトの実現までのカギとなるプレイヤーは誰か

３．次年度以降に技術開発を実施する緊急性について

（１）次年度以降に技術開発を実施する緊急性は合理的なものか。

４．国が実施する必要性について

（１）科学技術的価値の観点からみた卓越性、先導性を有している事業か。
・我が国が強みを持ち、世界に勝てる技術分野か

・他の研究分野等への高い波及効果を含むものか

５．当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業について

（１）当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業との関係性は適切か
・当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業として何があるか
・上記の関連性のある事業と重複がなく、また、適切に連携等が取れているか

【中間・事後評価】

１．事業の目的・政策的位置付けの妥当性

（１）事業目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。
・事業の政策的意義（上位の施策との関連付け等）
・事業の科学的・技術的意義（新規性・先進性・独創性・革新性・先導性等）
・社会的・経済的意義（実用性等）
（２）国の事業として妥当であるか、国の関与が必要とされる事業か。
・国民や社会のニーズに合っているか。
・官民の役割分担は適切か。

２．研究開発等の目標の妥当性

（１）研究開発等の目標は適切かつ妥当か。
・目的達成のために具体的かつ明確な研究開発等の目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準（基準値）が設定されているか。
・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

３．成果、目標の達成度の妥当性

（１）成果は妥当か。
・得られた成果は何か。
・設定された目標以外に得られた成果はあるか。
・共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの作製等があったか。
（２）目標の達成度は妥当か。
・設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

４．事業化、波及効果についての妥当性

（１）事業化については妥当か。

・事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。

（２）波及効果は妥当か。

・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。

・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

＊知的基盤・標準整備等の研究開発の場合、以下の評価項目・評価基準による。

４．標準化等のシナリオ、波及効果の妥当性

（１）標準化等のシナリオは妥当か。

・ＪＩＳ化や我が国主導の国際規格化等に向けた対応は図られているか。

（２）波及効果は妥当か。

・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。

・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

５．研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

（１）研究開発計画は適切かつ妥当か。

・事業の目標を達成するために本計画は適切であったか（想定された課題への対応の妥当性）。

・採択スケジュール等は妥当であったか。

・選別過程は適切であったか。

・採択された実施者は妥当であったか。

（２）研究開発実施者の実施体制・運営は適切かつ妥当か。

・適切な研究開発チーム構成での実施体制になっているか、いたか。

・全体を統括するプロジェクトリーダー等が選任され、十分に活躍できる環境が整備されているか、いたか。

・目標達成及び効率的実施のために必要な、実施者間の連携／競争が十分に行われる体制となっているか、いたか。

・成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。

・国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発で、３千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

（３）資金配分は妥当か。

・資金の過不足はなかったか。

・資金の内部配分は妥当か。

（４）費用対効果等は妥当か。
・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。
・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。
（５）変化への対応は妥当か。
・社会経済情勢等周囲の状況変化に柔軟に対応しているか（新たな課題への対応の妥当性）。
・代替手段との比較を適切に行ったか。

６．総合評価

Ⅱ－２　研究開発制度評価

※複数の制度の制度構造評価を実施する場合、参考に示す評価項目・評価基準に留意する。

【事前評価】

１．事業の必要性及びアウトカムについて（研究開発の定量的目標、社会的課題の解決や国際競争力強化への対応）

（１）事業の必要性はあるか（どのような社会的課題等があるのか）。
（２）アウトカム（目指している社会の姿）の具体的内容及び検証可能なアウトカム指標とその時期は適切に設定されているか。
（３）アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果の程度は優れているものか。
（４）アウトカムに至るまでに達成すべきいくつかの中間段階の目標（技術的成果等）の具体的内容とその時期は適切に設定されているか。

２．アウトカムに至るまでの戦略について

（１）アウトカムに至るまでの戦略に関して、以下の点について適切に計画されているか。
・アウトカムに至るまでのスケジュール
・知財管理の取扱
・実証や国際標準化
・性能や安全性基準の策定
・規制緩和等を含む実用化に向けた取組

（２）成果のユーザーの段階的イメージ・仮説は妥当なものか。

・技術開発成果の直接的受け手は誰か
・社会的インパクトの実現までのカギとなるプレイヤーは誰か

３．次年度以降に技術開発を実施する緊急性について

（１）次年度以降に技術開発を実施する緊急性は合理的なものか。

４．国が実施する必要性について

（１）科学技術的価値の観点からみた卓越性、先導性を有している事業か。
・我が国が強みを持ち、世界に勝てる技術分野か
・他の研究分野等への高い波及効果を含むものか

５．当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業について

（１）当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業との関係性は適切か
・当該事業のアウトカムと関連性のある省内外の事業として何があるか
・上記の関連性のある事業と重複がなく、また、適切に連携等が取れているか

【中間・事後評価】

１．制度の目的及び政策的位置付けの妥当性
（１）国の制度として妥当であるか、国の関与が必要とされる制度か。
（２）制度の目的は妥当で、政策的位置付けは明確か。
（３）他の制度との関連において、重複等はないか。

２．制度の目標の妥当性
（１）目標は適切かつ妥当か。
・目的達成のために具体的かつ明確な目標及び目標水準を設定しているか。特に、中間評価の場合、中間評価時点で、達成すべき水準（基準値）が設定されているか。
・目標達成度を測定・判断するための適切な指標が設定されているか。

３．制度の成果、目標の達成度の妥当性
（１）制度としての成果は妥当か。
・得られた成果は何か。
・設定された目標以外に得られた成果はあるか。
・共通指標である、論文の発表、特許の出願、国際標準の形成、プロトタイプの

作製等があったか。

（２）制度としての目標の達成度は妥当か。

・設定された目標の達成度（指標により測定し、中間及び事後評価時点の達成すべき水準（基準値）との比較）はどうか。

４．制度採択案件に係る事業化、波及効果等その他成果についての妥当性

（１）成果については妥当か。

・当該制度の目的に合致する成果は得られているか。

・事業化が目標の場合、事業化の見通し（事業化に向けてのシナリオ、事業化に関する問題点及び解決方策の明確化等）は立っているか。

（２）波及効果は妥当か。

・成果に基づいた波及効果を生じたか、期待できるか。

・当初想定していなかった波及効果を生じたか、期待できるか。

５．制度のマネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性

（１）制度のスキームは適切かつ妥当か。

・目標達成のための妥当なスキームとなっているか、いたか。

（２）制度の体制・運営は適切かつ妥当か。

・制度の運営体制・組織は効率的となっているか、いたか。

・制度の目標に照らして、個々のテーマの採択プロセス（採択者、採択評価項目・基準、採択審査結果の通知等）及び事業の進捗管理（モニタリングの実施、制度関係者間の調整等）は妥当であるか、あったか。

・制度を利用する対象者はその目標に照らして妥当か。

・個々の制度運用の結果が制度全体の運営の改善にフィードバックされる仕組みとなっているか、いたか。

・成果の利用主体に対して、成果を普及し関与を求める取組を積極的に実施しているか、いたか。

・国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、３千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発で、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

（３）資金配分は妥当か。

・資金の過不足はなかったか。

・資金の内部配分は妥当か。

（４）費用対効果等は妥当か。

・投入された資源量に見合った効果が生じたか、期待できるか。

・必要な効果がより少ない資源量で得られるものが他にないか。

（５）変化への対応は妥当か。

・社会経済情勢等周囲の状況変化に柔軟に対応しているか。

・代替手段との比較を適切に行ったか。

６．総合評価

（参考）制度構造評価

＜複数制度の俯瞰的評価＞

１．複数制度のバランス、相対的位置の妥当性

・他の制度との重複により効率が低くなっていないか。結果的に類似し重複や非効率が目立つ制度となってはいないか。

・産業技術戦略や内外情勢変化に即した制度の配置、構成となっているか。

・目標のレベル、国が関与すべき程度、実用化時期の想定等に関して、複数制度の相対的位置、複数制度間の政策目的に照らした整合性は妥当か。

・利用者から見て、制度間の相違（趣旨、対象者、要件等）が分かりにくいものとなっていないか。一方、複数の制度間で申請書類の様式が必要以上に異なり、利用者側に不用な負担をしいることとなっていないか。

＜個別制度の方向性項目＞

２．俯瞰的にみた個別制度の方向性

・内外情勢変化、他の制度との相対関係、個別制度評価の結果等を踏まえ、個別制度の継続、統廃合、新設の必要性はどうか。国の関与の度合いはどうか。

・統廃合を行う必要はなくても、運用面における連携、協調の必要性はどうか。

Ⅱ－３　競争的資金による研究課題に関する評価

＜ア．主として技術シーズの創造を目的とする競争的資金制度の場合＞

【事前評価】

１．目標・計画

・制度の目的（公募の目的）に照らして、研究開発目標・計画が具体的かつ明確に設定されているか。その目標の実現性、計画の妥当性はどうか。

２．科学的・技術的意義（新規性、先進性、独創性、革新性、先導性等）

・最新の研究開発動向・水準からみて新規性はあるか。
・研究開発内容について独創性はあるか。
・飛躍的に技術レベルを高めるような技術的ブレークスルーポイントがあるか。

３．実施体制

・研究開発代表者に十分な研究開発管理能力があるか。既に、相当程度の研究開発実績を有しているか。
・研究開発内容に適した研究開発実施場所が選定されているか。
・研究開発を行う上で、十分な研究開発人員（研究開発分担者）及び設備等を有しているか、また、研究開発を推進するために効果的な実施体制となっているか。

４．実用化の見通し

・研究開発の成果が実用化に結びつく可能性があるか。
・実用化された場合に、産業・社会への波及効果は認められるか。
・研究開発代表者又は研究開発チームに属する研究開発分担者が、当該研究開発の基礎となる特許を有しているか、又は出願中であるか。
・国内外で関連の特許が押さえられていないか。

５．想定される選択肢内の比較

・事業の提案に当たり、選択肢の吟味を行っているのか。提案する手段が最も優れていると考える根拠は何か。

【中間・事後評価】

１．目標・計画

・技術動向等の変化に対応して、事業の目的や計画は妥当であったか。
・成果は目標値をクリアしているか。

２．要素技術から見た成果の意義

・科学的・技術的意義（新規性、先進性、独創性、革新性、先導性等）が認められるか。

３．実施体制

・研究開発管理能力、研究開発実施場所、研究設備等実施体制は適切であったか。
・国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、３千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発で、公募要項に当該対話を実施す

ることが明記されている研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

４．実用化の見通し

・成果に関する特許の出願予定はあるか。
・実用化に向けた具体的な計画があるか。

＜イ．主として研究開発成果を早期に実用化することを目的とする競争的資金の場合＞

【事前評価】

１．必要性

・制度の目的に照らして、国の支援が必要な事業であるか。
・当該事業に対する社会的なニーズが具体的かつ明確となっており、ニーズを満たすために相当程度有効な事業であるか。

２．目標・計画

・制度の目的（公募の目的）に照らして、技術開発目標・計画が具体的かつ明確に設定されているか。その目標や計画は実現性が高い妥当なものとなっているか。
・実用化（事業化）に向けた具体的な計画を有し、実用化（事業化）の可能性が高いものとなっているか。

３．新規性、先進性、技術レベル

・革新的な新製品の開発に取り組むものであるか。
・既存製品の延長ではあるが経済性の格段の向上や新機能の付加が認められるなど、新規性・先進性を有しているか。
・技術開発の難易度が既存の技術水準に比して高い事業であるか。

４．実施体制

・事業を的確に遂行するために必要な開発体制及び能力を有しているか。既に、関連する研究開発等の事業経験があるか。

５．実用化（事業化）の見通し

・当該研究開発の基礎となる研究開発成果が確実なものとなっているか。
・実用化による産業・社会への波及効果は認められるか。
・実用化による市場の創出効果が大きいか。または市場を占めるシェアが大きいか。

・実用化した製品が継続的に受け入れられる市場環境にあるか。
・事業化に結びつくための生産に必要な資源の確保や、販売ルートを保有しているか。
・事業化に結びつくための（競争相手に対する）優位性が存在するか。

【中間・事後評価】

１．必要性

・社会的なニーズを満たすために相当程度有効な事業であったか。国の支援が必要な事業であったか。

２．目標・計画

・技術動向等の変化に対応して、事業の目的や計画は妥当であったか。
・成果は目標値をクリアしているか

３．要素技術から見た成果の意義

・新規性、先進性が認められるか。

４．実施体制

・開発体制及び能力は適切であったか。
・国民との科学・技術対話を効果的に実施したか、又は実施することとしているか。（ただし、３千万円以上の公的研究費の配分を受ける研究開発で、公募要項に当該対話を実施することが明記されている研究開発を実施する研究者等を対象とする。）ここで、国民との科学・技術対話とは、研究活動の内容や成果を社会・国民に対して分かりやすく説明する、未来への希望を抱かせる心の通った双方向コミュニケーション活動をいう（「国民との科学・技術対話」の推進について（基本的取組方針）（平成 22 年 6 月 19 日））。

５．実用化（事業化）の見通し

・成果に関する特許出願、国際標準の提案の予定はあるか。
・実用化に向けたスケジュールや体制は明確になっているか。
・実用化による産業・社会への波及効果は認められるか。
・実用化による市場の創出効果が大きいか。または市場を占めるシェアが大きいか。
・実用化した製品が継続的に受け入れられる市場環境にあるか。
・事業化に結びつくための生産に必要な資源の確保や、販売ルートを保有しているか。
・事業化に結びつくための（競争相手に対する）優位性が存在するか。

Ⅵ. 追跡評価

Ⅰ．波及効果に関する評価

Ⅰ－１．技術波及効果

（１）実用化への進展度合

・プロジェクトの直接的および間接的な成果は、製品やサービスへの実用化にどのように寄与したか、あるいは寄与する可能性があるか。特許取得やその利用状況、市場環境の変化、競合技術の台頭等を踏まえて評価する。

①プロジェクト終了後に実用化した製品やサービスは数多くあったか。

②プロジェクトの成果から今後実用化が期待される製品やサービスはあるか。

③多額の実施料収入を生み出す等、インパクトのある技術が得られたか。

④外国での特許取得が行われたか。

⑤基本特許を生み出したか。

（２）プロジェクト成果からの技術的な広がり具合

・プロジェクトの成果により直接的に生み出された技術は、関連技術分野に技術面でのインパクトを与えたか。派生技術には、プロジェクト実施当時に想定されていたもの、想定されていなかったものを含めてどのようなものがあり、それらはどのように利用されているかを踏まえて評価する。

①数多くの派生技術を生み出したか。

②派生技術は多くの種類の技術分野にわたっているか。（当該技術分野、他の各種技術分野）

③直接的に生み出された技術又は派生技術を利用した研究主体は数多くあるか。

④直接的に生み出された技術又は派生技術を利用する研究主体は産業界や学会に広がりを持っているか。（参加企業、大学等、不参加の同業種の企業、その他の産業等）

⑤参加企業等が自ら実施する研究開発の促進効果や期間短縮効果はあったか。

（３）国際競争力への影響

・直接的に生み出された技術の成果技術や派生技術により、国際競争力はどのように強化されたか。

①我が国における当該分野の技術レベルは向上したか。

②外国と技術的な取引が行われ、それが利益を生み出しているか。

③プロジェクトの技術分野に関連した外国での特許取得は積極的になされているか。

④国際標準の決定に対し、プロジェクトはメリットをもたらしたか。

⑤国際標準等の協議において、我が国がリーダーシップをとれるようになったか。

⑥外国企業との主導的な技術提携は行われたか。

⑦プロジェクトが外国の技術政策に影響を与え、その結果技術交流が促進され

たり、当該分野で我が国がイニシアチブをとれるようになったか。

Ⅰ－２．研究開発力向上効果

（１）知的ストックの蓄積度合

・特許や、研究者のノウハウ・センス・知識等の研究成果を生み出す源となる知的ストックはどのような役割を果たしたか。それらはプロジェクト終了後も継承され、次の研究の芽になる等、今後も影響を持ち得ることができるか。

①当該分野における研究開発は続いているか。

②プロジェクト終了後にも、プロジェクトに参加した研究者が派生技術の研究を行っているか。

③プロジェクトの終了時から現在までの間に、知的ストックが将来的に注目すべき新たな成果（画期的な新製品・新サービス等）を生み出す可能性は高まっているか。

（２）研究開発組織の改善・技術戦略への影響

・プロジェクトは、研究開発組織の強化・改善に対してどのように役立ったか。あるいは、実施企業の技術戦略に影響を与えたか。

①企業を超える研究開発のインフラとして、学会、フォーラム、研究者間交流等の公式・非公式の研究交流基盤は整備され、活用されているか。

②企業間の共同研究の推進等、協力関係、良好な競争的関係が構築されたか。

③顧客やビジネスパートナーとの関係の変化が、経済性を向上させたか。

④技術の管理組織を再編成する契機となったか。

⑤研究開発部門の再構成等、社内の組織改編は積極的に行われたか。

⑥研究開発の予算規模が増減する契機となったか。

⑦プロパテント等の特許戦略に対する意識が高くなったか。

⑧知的ストックは、企業の技術戦略にどのような影響を与えたか。

（３）人材への影響

・プロジェクトは研究者の効率的・効果的配置や能力の向上にどのように寄与したか。

①国内外において第一人者と評価される研究者が生まれたか。

②論文発表、博士号取得は活発に行われたか。

③プロジェクト従事者の企業内での評価は高まったか。

④研究者の能力向上に結び付くような研究者間の人的交流が行われたか。

⑤関連分野の研究者増員が行われたか。

⑥国内外から高く評価される研究機関となったか。

Ⅰ－３．経済効果

（１）市場創出への寄与

・新しい市場を創造したか。また、その市場の拡大に寄与したか。

（２） 経済的インパクト

・生産波及、付加価値創出、雇用創出への影響は大きかったか。
①直接的に生み出された技術や派生技術の実用化により、製品の売り上げと利益は増加したか。
②直接的に生み出された技術や派生技術の実用化により、雇用促進は積極的に図られたか。

（３）産業構造転換・活性化の促進

・プロジェクトが産業構造の転換や活性化（市場の拡大や雇用の増加等）にどのような役割を果たしたか。
①プロジェクトが、各関連産業における市場の拡大や雇用の増加等に寄与したか。
②プロジェクトが新たな産業の勃興や、既存市場への新規参入、あるいは既存市場からの撤退等をもたらしたか。また、それらが市場全体における雇用に影響したか。
③プロジェクトが生産業務の改善や更新に結びついたことにより生産性・経済性は向上したか。

Ｉ－４．国民生活・社会レベルの向上効果

・プロジェクトによって新たな製品・サービスが実用化されたこと、プロジェクトの成果の応用による生産性の向上や顕著なコストダウン、デファクトを含めた規格化を促進したこと等の事例がある場合、それらは、例えば下記に挙げる項目にそれぞれどのような影響をもたらしたか。

（１）エネルギー問題への影響

・エネルギー問題の解決に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

（２）環境問題への影響

・環境問題の解決に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

（３）情報化社会の推進

・情報化社会の推進に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。

（４）安全、安心、生活の質

・国民生活の安全、安心、生活の質の向上に寄与した効果としてどのようなものが考えられるか。
①国民生活の利便性を向上させた事例が存在するか。
②国民生活の安全性の向上に寄与したか。
③プロジェクトの成果は、身障者や高齢者の多様な生活を可能にしたか。また、個の自立を支援するものであるか。

Ｉ－５．政策へのフィードバック効果

（１）その後の事業への影響

・プロジェクトの成果や波及効果、改善提案、反省点等がその後の研究開発プロ

ジェクトのテーマ設定や体制構築へ反映されたか。

（２）産業戦略等への影響

・プロジェクトの直接的・間接的な成果が実用化したり、関連の研究開発基盤ができたこと等による、その後の産業戦略等への影響があったか。

Ⅱ．現在の視点からのプロジェクトの評価

Ⅱ－１．国家プロジェクトとしての妥当性

・国のプロジェクトとしてどのような効果があったか。Ⅰに示した各効果を総合的に評価する。

・現在（追跡評価時点）から見て、国が関与する必要性があったか。また、関与の方法や程度は妥当であったか

①多額の研究開発費、長期にわたる研究開発期間、高い技術的難度等から、民間企業のみでは十分な研究開発が実施されない場合。

②環境問題への先進的対応等、民間企業には市場原理に基づく研究開発実施インセンティブが期待できない場合。

③標準の策定、データベース整備等のうち社会的性格が強いもの（知的基盤）の形成に資する研究開発の場合。

④国の関与による異分野連携、産学官連携等の実現によって、研究開発活動に新たな付加価値をもたらすことが見込まれる場合。

⑤その他国が主体的役割を果たすべき特段の理由がある場合。

Ⅱ－２．目標設定

・当時の技術動向、市場動向、社会環境、政策目的等から見て、目標設定の方向性とそのレベルは妥当であったか。

Ⅱ－３．プロジェクト実施方法

・プロジェクトの計画策定、スキーム（予算制度）、実施体制、運営方法等の実施方法が現在の視点から見て妥当であったか。

Ⅱ－４．Ⅱ－１～Ⅱ－３の評価結果を踏まえ、プロジェクト終了時の事後評価の妥当性

・事後評価で行われた評価結果は、追跡評価の時点から見て妥当であるか。

（現在の事後評価項目の例示）

目的・意義の妥当性、目標の妥当性、計画内容の妥当性、国のプロジェクトであることの妥当性、研究開発体制・運営の妥当性、研究開発成果の計画と比較した達成度、実用化の見通し（成果普及、広報体制、波及効果）、総合評価、今後の提言

・今後の最終評価において改善すべき評価方法、考慮すべき要因等を提案。

Ⅱ－５．プロジェクト終了後のフォローアップ方法

・プロジェクトの成果の実用化や普及に対して、プロジェクト終了後のフォローアップ体制が適切であったか。後継の国のプロジェクトを立ち上げる必要は無かったか。
・不適切な場合の改善点、より効果を発揮するための方策の提案。

参考資料６

平成 22 年度次世代電力供給システムに係る技術に関する施策・事業評価報告書（概要版）

平成22年度技術に関する施策・事業評価報告書概要

技術に関する施策

技術に関する施策名	次世代電力供給システム
担当課	資源エネルギー庁　電力基盤整備課

技術に関する施策の目的・概要

昨今、気候変動問題への対応が地球規模の課題となっている中、化石エネルギーの利用に伴う温室効果ガスの排出抑制に関する関心が世界的に高まっている。

我が国の電源構成において、石炭火力発電は約25%、天然ガス火力発電が約30%を占めており、2030年以降も火力発電は我が国の電源構成の中で重要な位置づけである。

しかし、発電時に発生する単位当たり二酸化炭素排出量は他の電源に比べて大きく、地球環境問題での制約要因が多いという課題を抱えている。

また、我が国は世界最大の石炭および天然ガス輸入国であり、資源のほぼ100%を海外に依存している。よって、エネルギーの有効利用と環境負荷の低減に努めるため、我が国は長年にわたり化石エネルギーの利用技術の効率化に積極的に取り組むとともに、環境に適した世界最高水準の火力発電技術の開発・利用を実現してきたところである。

一方、温室効果ガスの排出抑制・エネルギー自給率向上、エネルギー源多様化、環境関連産業育成等の観点から、我が国は太陽光発電等の再生可能エネルギーの導入を進めているが、電力系統上の課題として、①余剰電力の発生や、②出力変動に伴う周波数変動調整力の不足、③配電系統における電圧上昇　等が指摘されているところである。よって、再生可能エネルギーの導入拡大に伴う電力系統上の課題への対策を進めなければ、我が国の電力の安定供給を阻害するおそれがある。

したがって、今後、再生可能エネルギーが導入拡大されることで電源が多様化する電力を効率かつ安定的に供給するため、送配電系統や発電運用技術の高度化を行い、送電効率の向上、余剰電力対策等の系統安定化対策を行うことで、環境対策および電力の安定供給を可能とする強靭な電力供給システムを確立していく必要がある。

将来に向けた世界的な気候変動問題の制約下で、環境負荷を低減させることを目的とした電力の安定供給にかかる技術開発は、我が国の環境及びエネルギー政策上極めて重要な施策である。

技術に関する施策評価の概要

1．施策の目的・政策的位置付けの妥当性

以下の観点から、施策の目的・位置づけは妥当であると判断する。

(1) 施策の目的の妥当性

我が国におけるエネルギー起源CO2排出量の3割を占める発電部門の削減は急務であり、また、多様化する電力とその供給方式の中で、①化石燃料を有効利用技術、②再生可能エネルギーの利用拡大技術、③高効率・安定供給技術の洗練化・高性能化を目指すことは、環境問題に配慮しつつエネルギーセキュリティを確保する一つの手段として、本施策の目的は、技術課題や具体的な数値目標及びスケジュール等を含め明確かつ妥当である。

特に、本施策は、長期間の基礎技術の確立と実用化に向けた実証試験が必要であるが、これらに係る開発リスクは大きく、国としてエネルギー関連技術の根幹部に投資することは十分に意義がある。

(2) 施策の政策的位置づけの妥当性

本施策は「Cool Earth－エネルギー革新技術計画」や「技術戦略マップ2009」、「エネルギー基本計画」の国家戦略に基づき、着実に技術開発を進めており、施策の位置づけは妥当かつ非常に重要である。

(3) 国の施策としての妥当

電力安定供給に係るエネルギー問題や気候変動問題、低炭素社会に向けた国家的な課題は将来のリターンが見えないため、民間企業のみで取り組むには開発リスクが大きい。また、技術開発を効率的に進める上では、省庁間連携や産学官連携の構築が必要な場面もある。これらのことから国家的な問題を解決するために伴う技術開発を効率的に推進するためには、国の施策として位置づけることが重要であり、本施策は妥当である。

一方、本施策に関連した「環境負荷低減やエネルギー効率向上」を狙いとした革新技術開発は、開発、実用化の期間が長く、また、革新技術は海外では開発予算も含め積極的な取り組みが進められていることから、我が国がこの分野で世界トップを維持するためには、開発・実用化期間の抜本的短縮と革新技術開発の継続的推進に係る具体的な施策が必須である。

また、本施策は世界のエネルギー問題や環境問題の解決にも貢献することができることから、世界展開を視野に入れたマーケティング調査や資金的支援等、国としての体制作りを行う必要性があると考えられる。

2．施策の構造及び目的実現の見通しの妥当性

以下の観点から、施策の目的・位置づけは妥当であると判断する。

(1) 施策の構造について

高効率火力発電技術や送配電技術は、本施策において重要な位置づけであり、それぞれについて必要な事業が過不足なく配置され、事業規模に見合った予算やスケジュールが組まれている。

(2) 個別技術開発の成果について

先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発事業について研究開発の時間的スパンを考慮した場合、中間評価を行うタイミングが時期尚早である感は否めないが、各事業の個別成果は、各々の目標

に対して同等以上の成果が得られており、世界に通用する技術成果であると評価できる。特に、噴流床石炭ガス化発電プラント実証事業については、商用化に向けていくつか技術課題が残ったものの、実証試験として、実証事業開始当初の目標は達成できたと判断できる。

(3) 技術開発支援のあり方について

それぞれの技術開発について次世代電力供給システムを実現するキーテクノロジーであり、高効率火力発電技術や送配電技術に関する技術開発支援を行う意義は大きい。特に、先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発事業は欧州に10年遅れてスタートしたが、これまでの超々臨界圧火力発電の豊富な経験を生かして研究が進展し、欧米を凌駕した高温高強度金属材料の開発がされつつあると判断できる。

一方、以下の課題が見受けられる。

(1) 施策の構造について

事業の推進段階に応じて開発の前倒しも含めた見直し修正が必要であり、ま、海外に対する技術戦略は常に見直すべきである。このため、我が国の事業の成果と問題点ならびに課題を定期的に整理・見直し、目的達成に必要な新たな施策や産学官連携を構築していく仕組み作りが必要である。

また、事業によっては、本来の目的が実施可能であるか不明な事業もあり、かつ事業実施期間が短い事業もあることから中間評価の実施期間について、事業のないような対象によって適切に設定されるべきである。

(2) 技術開発支援のあり方について

施策の目的を実現するための事業として、現在研究が進行しているLiイオン電池に代わる新しい概念に基づく電池あるいは電力貯蔵システムの先進的研究を早々に開始する必要性がある。

3．総合評価

エネルギーセキュリティや気候変動問題、輸出競争力強化に対する面からも欠くことのできない国の施策であり、商用化の見通しも含めて継続的に実施すべき事業である。　特に、エネルギー関連技術に関する国の施策として、火力発電の高効率化技術と送配電系の最適制御技術等の関連設備や関連技術の実証試験を組み合わせた複合的事業の発展と各事業感の有機的な連携にとって一層大きな成果が期待できると判断できる。

また、各事業で実施期間中に得られた成果や技術の一部は、当該分野のみならず、運輸、機会、自動車、航空機等の各分野に最新技術として適用されている事例も多くあり、高効率化や洗練化に大きな役割を果たしている。

さらに、産学官連携によりエネルギー関連技術の発展に向けた技術協力を積極的に推進することにより、先進技術開発に関心を寄せなかった国民を啓発する効果が期待できる。

以上のことから、いずれの事業もその目的や政策的位置づけは明確であり、国として取り組むべき施策であると言える。

今後の研究開発の方向等に関する提言

次世代電力供給システムの技術開発の中で、再生可能エネルギーの導入が積極的に推進される中、化石燃料を用いた発電の割合は将来的にも大きく、その中でも温室効果ガスのCO2排出量が極端に大きい石炭火力発電をより高性能化・洗練化しようとする試みは、国としてエネルギーセキュリティ及び気候変動問題を解決していくために重要である。また、本施策は、産業界の国際競争力強化や広く産業界において活用される新技術や技術資料を創出するため我が国の最も重要な施策の一つである。当該分野の研究開発は、長い期間と巨額の費用を必要とするため、民間企業や団体が単一で実施する性格のものではなく、欧米の例からもわかるように国の関与なしでは実現できない分野であり、今後推進すべき具体的強化施策として以下の通り提言する。

（1）欧米に比べて極端に少ない開発補助費用の増大

（2）これまでの開発研究から実証研究までの開発費の補助に加えて、今後は世界初の実用化を進めて輸出競争力を強化するために、初号機建設までの資金補助の延長

（3）類似製品や技術波及製品への積極的な開発費の補助

さらに、革新技術の開発を進めるため、産学官連携による研究開発を積極的に行い、オールジャパンによる技術開発及び技術普及に係る推進体制の確立が重要である。

しかし、従来、国の研究開発プロジェクトとして基礎研究や実用化に向けての検討が行われた数多くの技術が、研究開発プロジェクトの実施期間終了と共に推進力を失い、蓄積されたノウハウや技術が有効に活用されていないまま放置され、商用化に至っていない前例は数多くある。当該施策は、我が国のエネルギー供給の将来を決定する重要な施策であり、プロジェクトの継続と実用化に向けての努力を期待するとともに、事業の推進段階に応じて技術戦略を柔軟に見直し、目的達成に必要な新たな施策を構築していく仕組み作りが必要不可欠である。

技術に関する事業

技術に関する事業名	A. 噴流床石炭ガス化発電プラント開発実証
上位施策名	エネルギー源の多様化・エネルギーの高度利用
担当課	電力基盤整備課

事業の目的・概要

石炭は、他の化石燃料に比べ供給安定性が高いが、燃焼過程における単位発熱量あたりの CO2 発生量が大きいことから、石炭の高効率発電技術を確立することにより、長期にわたるエネルギーの安定供給と環境に調和した石炭の有効利用を図る。

既存の石炭発電技術（微粉炭火力技術）に比べ、飛躍的な熱効率の向上が期待できる石炭ガス化複合発電技術（IGCC:Integrared coal Gasification Combined Cycle）について、微粉炭を空気により高効率にガス化する噴流床方式による技術等を開発し、商用機（微粉炭火力発電 500～600MW 相当）と同型、かつ、商用機の約 1／2 規模の IGCC 実証プラント（250MW）を建設して（平成 19 年 9 月完了）、運転試験を行うことにより、商用 IGCC を導入するのに必要な信頼性、耐久性、高効率性、経済性等を検証するのを補助する。

予算額等（補助（補助率：3/10））　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事実施主体
平成 11 年度	平成 21 年度	平成 20 年度	平成 22 年度	
H19FY 予算額	H20FY 予算額	H21FY 予算額	総予算額	総執行額
1,596,000	2,067,219	1,199,860	27,425,685	25,214,836

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

目標・指標		成果	達成度	新たに見出された課題
信頼性	年利用率 70%以上の見通しが得られること	・夏季ピーク期間(3ヶ月)相当の安定運転を確認 ・5,000 時間耐久性確認試験において延べ 5,000 時間の運転を確認	達成 (課題あり)	・ガス化炉後流熱交換器(SGC) 管詰まりについては、炭種適合 とも関連する課題として今後も 続き検討が必要 ・既に実施済みの対策について 中長期的な耐久性等の検証が 要
熱効率	送電端効率 40.5%(HHV ベース)程度	送電端効率 40.6%(HHV)を達成	達成	―

環境性	・SOx：8ppm（16%O_2換算） ・NOx：5ppm（16%O_2換算） ・ばいじん：4mg/m^3N（16%O_2換算）	・SOx：0～4.1ppm（16%O_2換算） ・NOx：3.4～4.8ppm（16%O_2換算） ・ばいじん：0.3～0.6mg/m^3N（16%O_2換算）	達成	－
炭種適合性	微粉炭火力に適合しにくい灰融点の低い石炭（灰溶融温度1400℃以下）を使用し、安定運転ができること	・設計炭での安定運転を確認 ・亜瀝青炭2炭種（北米炭、インドネシア炭）での専焼が可能であることを確認	達成（課題あり）	・ガス化炉後流熱交換器（SGC）伝熱管詰まりが発生しプラント停止に至っており、炭種性状に応じてトラブルの発生防止など、様々な対応が必要なことが判明
経済性	発電原価が微粉炭火力と同等以下となる見通しを得ること	・建設費は商用量産段階では微粉炭火力の2割程度増の見込み ・熱効率は微粉炭火力より向上の見込み ・今後も石炭価格は上昇傾向が見込まれ、発電原価として微粉炭火力と同等以下となる見通しは得られる可能性あり	達成（課題あり）	・修繕費については、定検未実施であることや設備点検サンプル数が少ないため、コスト低減に向けて今後の精度向上が望まれる

(2) 目標及び計画の変更の有無

無

＜共通指標＞

論文・投稿	発表	特許等件数（出願を含む）
45	96	11

総合評価概要

噴流床石炭ガス化発電（IGCC）プラント実証事業は、低品位炭を有効活用する点で、我が国のエネルギーセキュリティの確保及び気候変動問題の解決に貢献するものであり、事業の目的、政策的位置づけは妥当である。

本事業は、世界で唯一の空気吹きIGCCである。11年を超える実施期間と5000時間にも及ぶ耐久確認試験を経て得られた知見や膨大な資料は極めて貴重であり、来るべき商用化に向けての問題点が明確になったと共に、実現に向けての信頼性や経済性が確認できた。また、時代のニーズに柔軟に対応

することで当初の目標を一部変更し、設計炭以外の炭種による実証試験を行ったところ、専燃することに成功した。これは低品位炭の利用拡大であり、我が国のエネルギーセキュリティの更なる確保の点で意義が大きい。

さらに、実証試験による送電端効率は 40.6%（HHV）であり、世界の年間発電電力量の 7～8 割を石炭火力発電に依存し、かつ石炭火力発電所の熱効率平均が 30%程度であることからも我が国が開発した IGCC は波及効果が大いに期待できる。

開発に係る体制等についても、平成 11 年の事前検証試験を踏まえた基本設計、詳細設計、設備等設計、運転試験までの研究開発計画に始まり、総事業費のコストダウンや開発体制等、我が国の電力事業者の総力を挙げた取り組み、運営は適切かつ妥当である。

一方、世界では酸素吹き IGCC が開発されているため、熱効率等の面から最新のデータを用いて比較を行い、空気吹き IGCC の位置づけを明確にする必要がある。

また、商用機への新たな課題が出てきたため、これらの技術的解決には相当時間を要するため、継続的な試験及び評価が必要であることとともに、事業者のみでは限界があるため国の事業として補助することも検討することが必要である。

さらに、商用化に向けての具体的なシナリオを提示するとともに、IGCC 建設については、国として海外立地を含めた実用化支援への取り組みが必要であると考える。

今後の研究開発の方向等に関する提言

本技術は、我国が20数年を掛けて構築してきたエネルギー関連の日本独自の巨大技術であり、我国のみならず海外へも大きく貢献できるものと期待され、そのニーズは益々大きくなっている。この観点から、事業者による商用機の経済性の確保と更なる安定運転技術や保守技術確立のために、2年間の独自研究が予定されているとのことであるが、期待するところ大である。

その際に、熱効率の向上や、設備・システムの簡素化によるコストダウンや信頼性向上などの検討と共に、この 2 年間の独自研究の間に 1600℃級 J 型ガスタービンが実用化の時期を迎えることで、噴流床石炭ガス化（IGCC）発電プラントに 1600℃級 J 型ガスタービンを適用した場合の経済性検討を実施して頂き、より魅力ある発電プラントとして仕上げて頂くことを期待したい。

また今後 2 年間の独自研究で商用機の見通しが得られた段階で、次段階研究（国プロ）として 2%の熱効率向上を狙いに、乾式脱硫技術の見通しを確認して将来の布石としておくことを期待したい。確認方法としては、本 IGCC システムの中の排ガス処理の一部を湿式脱硫から乾式脱硫に替えて運転し、システムや環境に与える影響を明らかにしておくことで、商用機の次世代型につなげるための乾式脱硫技術の実証が完了できるものと考える。

さらに、本空気吹き噴流床石炭ガス化発電技術は、ほぼ所期のスケジュールで研究開発が進捗しており、現在民間ベースで商用化へ向けたワンランク上の実証試験が継続されている状況である。これにより、商用機については十分な信頼性が得られる見通しであるので、国としても海外立地を含む実用化支援への取り組みが必要であると考える。

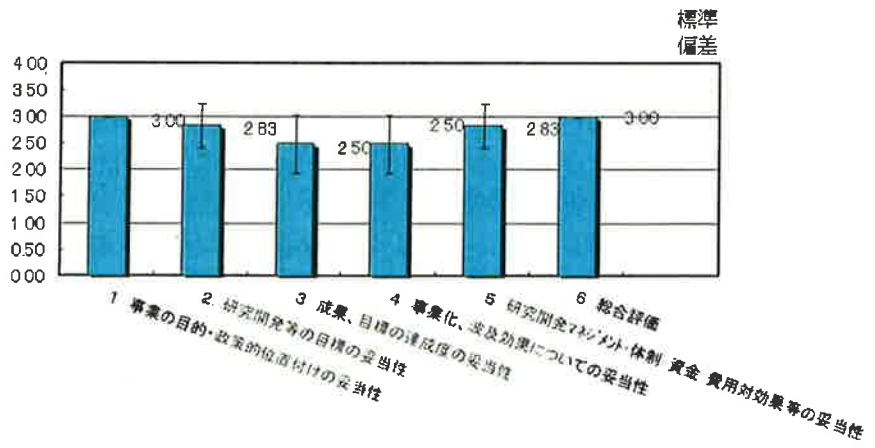
評点結果

評点法による評点結果

（噴流床石炭ガス化発電プラント実証事業）

評　価　項　目	平 均 点	標準偏差
1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	3.00	0.00
2．研究開発等の目標の妥当性	2.83	0.41
3．成果、目標の達成度の妥当性	2.50	0.55
4．事業化、波及効果についての妥当性	2.50	0.55
5．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ･体制･資金･費用対効果等の妥当性	2.83	0.41
6．総合評価	3.00	0.00

（各項目:3点満点）



技術に関する事業

技術に関する事業名	B. 高効率ガスタービン実用化技術開発
上位施策名	省エネルギーの推進
担当課	電力基盤整備課

事業の目的・概要

省エネルギー及びCO2削減の観点から電力産業用高効率ガスタービンを開発し、我が国のエネルギーセキュリティの確保、地球環境問題解決への貢献及び産業競争力の強化に資する。

省エネルギー及びCO2削減の観点から電力産業用高効率ガスタービンの実用化を目指し、大容量機（25万kW程度（コンバインド出力40万kW））の高効率化（52%→56%）のために、1700℃級ガスタービンの実用化に必要な先端要素技術を適用した各要素モジュールの検証等を実施する。

また、小中容量機（10万kW程度）の高効率化（45%→51%）のために有望とされている高湿分空気利用ガスタービン（AHAT）の実用化に必要な多段軸流圧縮機、多缶燃焼器等の開発を行うとともにシステムの信頼性等の検証を実施する。

予算額等（補助（補助率：2/3））　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事実施主体
平成20度	平成23年度	平成22年度	平成23年度	
H20FY 予算額	H21FY 予算額	H22FY 予算額	総予算額	総執行額
540,000	1,644,689	3,081,000	6,986,979	6,812,736

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

<1700℃級ガスタービン実用化技術開発>

要素技術	目標・指標（中間評価）	成果	達成度
全体の目標	コンバインド効率56%以上（HHV）	最新のデータを反映した予想値は57%（HHV）	達成
排ガス再循環システム／低NOx燃焼器の開発	NOx排出量50ppm以下	燃焼試験で他による実機推定値はNOx排出量48ppmである。	達成
高性能冷却システムの開発	冷却空気量30%低減（従来比）	冷却空気量 30%低減（従来比）の目処を得た。	達成
低熱伝導率 TBCの開発	遮熱効果を現状材（YSZ）より 20%向上	遮熱効果を現状材（YSZ）より20%向上低減した。	達成

高負荷・高性能タービンの開発	1500℃級ガスタービンに比べ 30%高い負荷条件において、1軸タービン、段数従来並みで、効率 91%以上	回転翼列試験により91.3%の効率達成の目処が得られた。	達成
高圧力比高性能圧縮機の開発	圧力比 30 以上において、1軸圧縮機、段数従来並みで、効率 89%以上	回転翼列試験により、89.3%の効率達成の目処が得られた。	達成
総合評価	―	中間評価時点での目標を全て満足している。	達成

＜高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発＞

要素技術	目標・指標（中間評価）	成果	達成度
①高湿分 軸流圧縮機	・解析により、 吸気噴霧量：3.5%時の特性確認	噴霧量3.5%時には圧縮機後段側の負荷が高くなる。このため圧縮機後段側静翼の取付角を増加させて翼負荷を減少させることにより、全段で成立した。	達成
②高湿分 再生熱交換器	・解析により、温度効率：90%以上、伝熱面密度：1000m2/m3以上を確認	従来フィンより耐圧強度が高く、かつ伝熱面密度も極力大きくした新型高性能 フィンを新たに開発することで、温度効率：90%以上、1000m2/m3以上の伝熱面密度を達成した。	達成
③高湿分 多缶燃焼器	・要素試験により、高湿分燃焼でNOx：10ppm以下を確認	側方4方ノズルを開発し、バーナ要素試験で効果を確認した。さらに実寸の単缶燃焼試験により、総合試験条件で10ppm以下を確認した。	達成
④高湿分冷却翼	・目標冷却効率(静翼70%動翼60%)を達成可能なﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ冷却翼の設計	目標冷却効率を達成可能なﾊｲﾌﾞﾘｯﾄﾞ冷却翼で、翼前部を圧縮機吐出空気で冷却、翼後部を高湿分空気で冷却することにより、許容メタル温度以下を達成した。	達成
⑤3MW級検証機	・AHATプラント側の特性把握	5～35℃の範囲で大気温度特性を取得した。増湿量のほぼ100%を水回収できた。再生熱交換器の温度効率90%以上を維持できていることを確認した。	達成
⑥実用化技術 総合試験	・総合試験装置の設計	総合試験装置の設計を完了し、製作を開始した。	達成
⑦AHAT特性解析	・3MW級検証機評価	3MW試験でｺｰﾙﾄﾞ起動時間60分を達成し、ｺﾝﾊﾞﾝﾄﾞｻｲｸﾙと比較し起動特性で優位であることを確認した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

無

＜共通指標＞

論文・投稿	発表	特許等件数 （出願を含む）
25	56	75

総合評価概要

本事業は、国が掲げる総合的なエネルギー効率向上を目指すに当たり、発電効率の大幅な向上が見込まれる技術であり、また、天然ガスを用いた高効率ガスタービンの導入は世界的に増大することが期待されること、燃料多様化に伴うエネルギーセキュリティの確保の点から事業の目的、政策的位置づけは妥当である。

また、本事業は、大容量機と中小容量機の２つの観点から事業を進めているが、ともに世界初の技術であり、中間目標の達成度は定量的かつ客観的に見て妥当である。

さらに、大容量機が対象である1700℃級ガスタービン実用化技術開発においては、これまでの成果の一部を用いた1600℃級ガスタービンの実用化に反映されており、数年後の商用化も決まっていること、中小容量機が対象である高湿分空気利用ガスタービン実用化技術開発では、同規模のコンバインドサイクルと比較して安価で高効率なシステムとなることが期待されることから今後の波及効果は大いに期待できる。

開発に係る体制についても両事業とも多岐にわたる新規技術の開発が必要であり、それぞれの分野でトップランナである各大学や各メーカー、他省庁による産学官連携で開発を行っているとともに、世界の動向や技術のトレンドを分析して的確な対応が為されているため成功確率の高い研究開発計画であるため、本事業は積極的に推進すべき事業である。

一方、一部の項目については定性的な説明が為されているため、目標の妥当性について定量的な説明をするとともに、技術の普及を進めるため、より一層の産学官連携が望まれる。

また、検討状況によっては一部不明な部分があること、開発スケジュールに対して実用運転実現までの間に相当の乖離があるため、運転試験の特性評価を密に行うこととともに、更なる新技術の開発が必要不可欠であると考える。

今後の研究開発の方向等に関する提言

本事業は、国が掲げる総合的なエネルギー効率向上を目指すに当たり、発電効率の大幅な向上が見込まれる技術であり、また、天然ガスを用いた高効率ガスタービンの導入は世界的に増大することが期待されること、燃料多様化に伴うエネルギーセキュリティの確保の点で優れている。

特に、1700℃級ガスタービンの実用化技術開発は、1700℃級ガスタービンの実証機設計のための要素開発であり、今後計画されている圧縮機モジュール試験、高温高圧翼列試験、高圧燃焼試験はできる限り時間をかけて実施し、信頼性を確認していただきたい。

高湿分空気利用ガスタービン実用化技術は商用機規模での実証試験の前フェーズであり、説得力を持って実証試験につなげるためにも今後計画されている1/3スケールの実用化技術総合試験で長期信頼性、効率、経済性などをしっかり確認していただきたい。

また、研究開発体制について、大学のポテンシャルを有効活用し、産学官で事業に取り組むことにより国際性のある人材の育成にも貢献できるため、より一層の体制の構築に努めていただきたい。

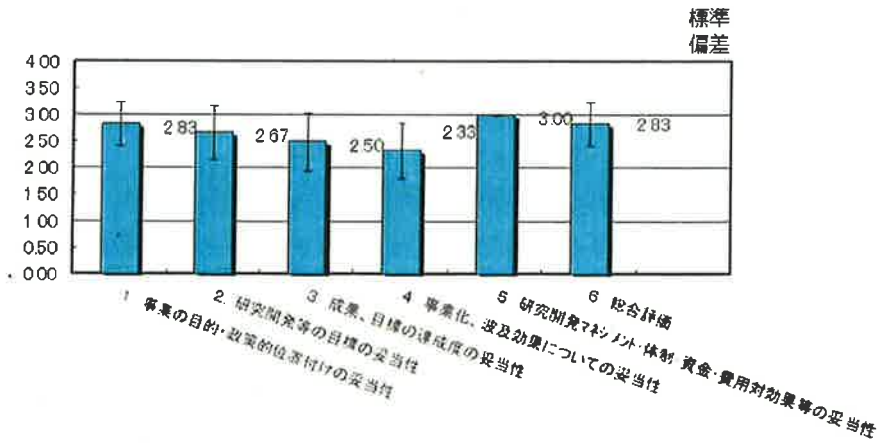
評点結果

評点法による評点結果

（高効率ガスタービン実用化技術開発）

評　価　項　目	平 均 点	標準偏差
1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.83	0.41
2．研究開発等の目標の妥当性	2.67	0.52
3．成果、目標の達成度の妥当性	2.50	0.55
4．事業化、波及効果についての妥当性	2.33	0.52
5．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	3.00	0.00
6．総合評価	2.83	0.41

（各項目:3点満点）



技術に関する事業

技術に関する事業名	C. 先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発
上位施策名	エネルギー源の多様化・エネルギーの高度利用
担当課	電力基盤整備課

事業の目的・概要

従来型石炭火力発電の中で最高効率である超々臨界圧発電（USC）では、上記温度は630℃程度が限界で、熱効率も42～43%(送電端HHV)が原理的限界と言われてきた。しかしながら、近年の材料技術に進歩により700℃以上、上記圧力24.1MPa以上の蒸気条件を達成できる可能性が見えてきたことから、これらの材料を活用した先進超々臨界圧発電（A-USC）を開発し、エネルギーセキュリティの確保及びCO2排出量の削減による環境適合を図る。

A-USCは、蒸気温度700℃級で46%、750℃級で48%、800℃級で49%の高い熱効率（送電端HHV）の達成が可能な技術であり、2020年以降増大する経年石炭火力発電のリプレース需要に対応するため、早急に技術開発を進める必要がある。

予算額等（補助（補助率：2/3））　（単位：千円）

開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成20年度	平成28年度	平成22年度	平成31年度	
H20FY 予算額	H21FY 予算額	H22FY 予算額	総予算額	総執行額
200,000	742,590	742,590	8,673,384	8,627,439

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

要素技術	目標・指標（中間評価）	成果	達成度
システム設計、設計技術開発	システム設計により熱効率46%以上を確認	システム設計により熱効率46%を確認した。	達成
ボイラ要素技術開発	候補材料を選定し、数千から一万時間程度の短時間試験からの外挿により達成の可能性を検討する。	候補材料を選定し、短時間試験を行った。 数千から一万時間程度の短時間試験からの外挿により10万時間のクリープラプチャ強度について達成の可能性があることを確認した。	達成
タービン要素技術開発	候補材料を選定し、数千から一万時間程度の短時間試験からの外挿	候補材料を選定し、短時間試験を行った。	達成

	により達成の可能性を検討する。	数千から一万時間程度の短時間試験からの外挿により10万時間のクリープラプチャ強度について達成の可能性があることを確認した。	
高温弁要素技術開発	要素試験により材料選定作業を行う。	弁材料の摺動試験、水蒸気酸化試験等を実施し、700℃条件下で使用できる材料の組合せがあることを見出した。	達成
実缶試験・回転試験	実缶試験・回転試験基本仕様の検討を行う。	試験の基本要項を策定した。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

無

＜共通指標＞

論文・投稿	発表	特許等件数（出願を含む）
7	18	0

総合評価概要

先進超々臨界圧火力発電（A-USC）実用化要素技術開発は、国が掲げる総合的なエネルギー効率向上を目指すに当たり、発電効率の大幅な向上が見込まれる技術であり、また、「Cool Earthーエネルギー革新技術開発」等の目標との整合性もあることから事業の目的、政策的位置づけは妥当である。

また、本事業は中間目標に対して同等以上の成果を上げている一方、開発材料の長期高温試験の期間が相当短いため、その範囲では妥当な結果が得られていることを評価する。

さらに、本事業は発電を行う際、石炭の専燃だけでなくバイオマス燃料との混焼も可能な技術であること、熱効率46%がもたらすCO2削減効果、老朽化石炭火力発電所からのリプレースを考慮すると、エネルギーセキュリティや気候変動問題の解決に向けた効果とともに、世界の年間発電電力量の7～8割を石炭火力発電に依存し、かつ石炭火力発電所の熱効率平均が30%程度であることからも我が国が開発したA-USCは波及効果が大いに期待できる。

開発に係る体制についても研究開発を統括するため事業社内で各種委員会を設置し、抜けのない研究開発を行っているほか、電力ユーザや大学等の意見も取り入れる体制作り、世界の動向や技術のトレンドを分析して的確な対応が為されているため、本事業は推進すべき事業である。

一方、開発材料の長期耐久試験は期間不足のため、正確に検証することができないとともに外挿による検証は不確かなため、本中間評価は開発目標の妥当性も含めて判断するには時期尚早である。また、本事業の課題、検討事項は明確であるが、解決に向けた方策、開発に関する投入資金と成果との

関連性、材料開発以外の分野に関する具体的な研究方針を明らかにするべきである。

今後の研究開発の方向等に関する提言

本事業は、国が掲げる総合的なエネルギー効率向上を目指すに当たり、発電効率の大幅な向上が見込まれる技術である。

この技術は高強度材の溶接構造となっていることから、その長期信頼性が最も重要である。今後広い観点から検証し、説得力のあるデータの蓄積に努めてもらいたい。

また、各企業が独自の材料を用いて平行に技術開発を進めると膨大な予算になることが懸念される。プロジェクトの進展に伴って標準化や絞り込みを行うことも視野に入れて開発を進めていただきたい。

さらに、研究開発体制について、大学のポテンシャルを有効活用し、産学官で事業に取り組むことにより国際性のある人材の育成にも貢献できるため、より一層の体制の構築に努めていただきたい。

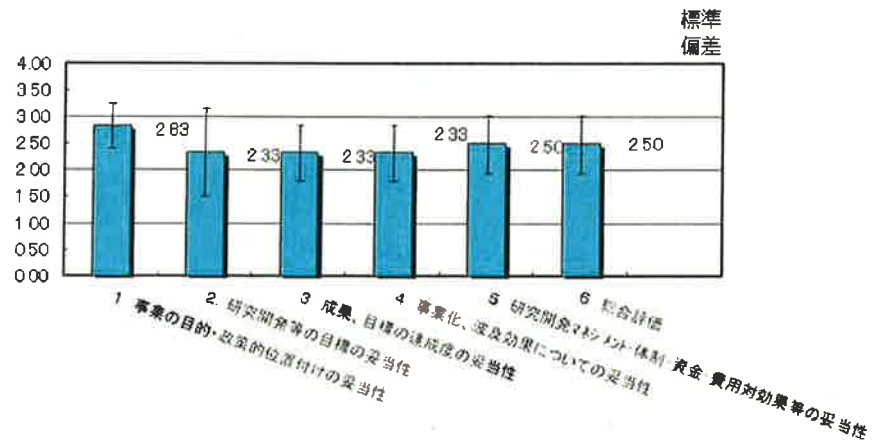
評点結果

評点法による評点結果

（先進超々臨界圧火力発電実用化要素技術開発）

評　価　項　目	平 均 点	標準偏差
1．事業の目的・政策的位置付けの妥当性	2.83	0.41
2．研究開発等の目標の妥当性	2.33	0.82
3．成果、目標の達成度の妥当性	2.33	0.52
4．事業化、波及効果についての妥当性	2.33	0.52
5．研究開発ﾏﾈｼﾞﾒﾝﾄ・体制・資金・費用対効果等の妥当性	2.50	0.55
6．総合評価	2.50	0.55

（各項目:3点満点）



平成22年度事前評価報告書概要

新規研究開発事業	次世代型双方向通信出力制御実証事業
技術に関する施策名	２８　原子力の推進・電力基盤の高度化
事業推進課	電力基盤整備課

技術に関する施策及び新規研究開発事業の概要

事業の目的

太陽光発電の大量導入に伴う電力系統安定化対策（特に余剰電力対策）について、ゴールデンウィーク等の特異日における太陽光発電の出力制御や系統用蓄電池の設置等が検討されているところ。

太陽光発電の出力制御を行う場合、現在の技術水準等にかんがみ、太陽光発電のＰＣＳにカレンダー機能を追加し、特定日等において出力抑制を行うことが想定されているが、太陽光発電の設置者の機会損失（出力抑制）を最小限に抑えることが大きな課題となっている。

したがって、太陽光発電の出力抑制や通信機能を用いた太陽光発電や系統用蓄電池の制御等を行うことにより、太陽光発電等の大量導入と電力系統の安定化、系統安定化対策コストの最小化を図ることを目的とする。

なお、現在のところ、再生可能エネルギー電源等の通信制御は、世界的に見ても行われておらず、今後の我が国のスマートグリッドの国際展開を図る上でも非常に有効なツールになり得るものと考えられる。

事業の概要

1. 通信手段による出力抑制機能付きパワコンの開発、実証
2. 通信手段による電圧調整機能付きパワコンの開発、実証
3. 双方向通信の導入に向けた通信手段（ＰＬＣ、光ファイバ、メタル、無線等）の実証
4. メガソーラーや風力発電所等の通信制御の実証
5. 住宅用太陽光発電の通信制御の実証

評価概要

１．事業の目的・政策的位置付け（新規研究開発事業の創設）の妥当性

太陽光発電の大量導入に対応する系統安定化対策である出力抑制を双方向通信で行うことは需要家側の機会損失の低減にもつながるとの前提の上で、電力系統に関わる設備更新については10年単位の時間を要することから、早急に実証を開始して必要な知見を得ることが望ましい。また、出力抑制機能の導入は、ユーザーの直接的な経済合理性に合致するものではないため、市場で自発的に進められるものではないことから、本研究目的の達成のためには国の関与が必要である。

なお、開発のプロセスとして、いきなり「双方向通信による出力抑制機能」を開発するのではなく、「カレンダー機能によるPCSの出力抑制機能の開発」も「新規研究開発事業の概要」に記載し、明確に開発を位置づけるべきではないか、とも考えられる。また、需要家PV制御実証だけでなく、系統PV/蓄電池/風力も含める必要性や、国際標準化に関する他研究会との連携の必要性についても検討するべきである。

２．今後の新規研究開発事業の実施に向けての提言

通信手段の選定に関して、普及可能性の高さの観点から、通信手段を適宜組み合わせることを視野に入れるべきである。

平成22年度事前評価報告書概要

新規研究開発事業	太陽光発電出力予測技術開発実証事業
技術に関する施策名	２８　原子力の推進・電力基盤の高度化
事業推進課	電力基盤整備課

技術に関する施策及び新規研究開発事業の概要

事業の目的

太陽光発電の出力は、天候等により大きく変動し、現時点では太陽光発電の出力データや分析等について十分な知見が得られていないため、太陽光発電の出力予測は困難である。また、太陽光発電の導入量が拡大すると、短期的な需給バランスが崩れ周波数が適正値を越える等、電力の安定供給に問題が生ずる可能性も指摘されている。

太陽光発電の出力変動に伴う短期的な需給バランス・周波数調整力の確保のためには、系統側の対策（揚水発電の新増設、系統側蓄電池の設置等）に加えて、気象予報等を基にした太陽光発電の出力予測手法の開発や出力の把握手法の開発が不可欠である。

事業の概要

（１）太陽光発電の出力データの把握手法の開発

日射量計や配電系統に設置される電圧・潮流センサー等を活用し、太陽光発電のマクロでの出力状況の把握技術を開発。

（２）太陽光発電の出力予測技術の開発

気象予報や太陽光発電の出力状況把握技術の確立のもと、日単位や数分（３～５分）程度の太陽光発電の出力予測技術を開発し、電力系統における安定的な需給運用へつなげる。

評価概要

１．事業の目的・政策的位置付け（新規研究開発事業の創設）の妥当性

2020年の太陽光発電の大量導入と電力系統の安定運用の両立に向けて、日単位から数分程度の出力予測技術の確立が不可欠であり、事業の早期開始が必要である。

また、出力予測技術の高度化とその変動を考慮した需給制御は、世界的に見た差別化技術としての位置付けを期待できる。

なお、太陽光出力データ収集実証事業との関係を明確にすること、あるいは連動性を持たせるべきである。

また、事業成果の積極的な公開、及び審議会への上程を希望する。

２．今後の新規研究開発事業の実施に向けての提言

効率性と汎用性の双方の観点から、実証箇所及び各箇所の範囲の選定を行うべきである。

また、要素技術開発のみならずシステム実証まで含めた事業構成としていることについては、肯定的に評価したい。