

2014.1.30

総合資源エネルギー調査会
原子力の自主的安全性向上
に関するWG 第8回会合
資料3

安全対策高度化に係る研究開発

東京大学大学院工学系研究科

関村 直人

はじめに

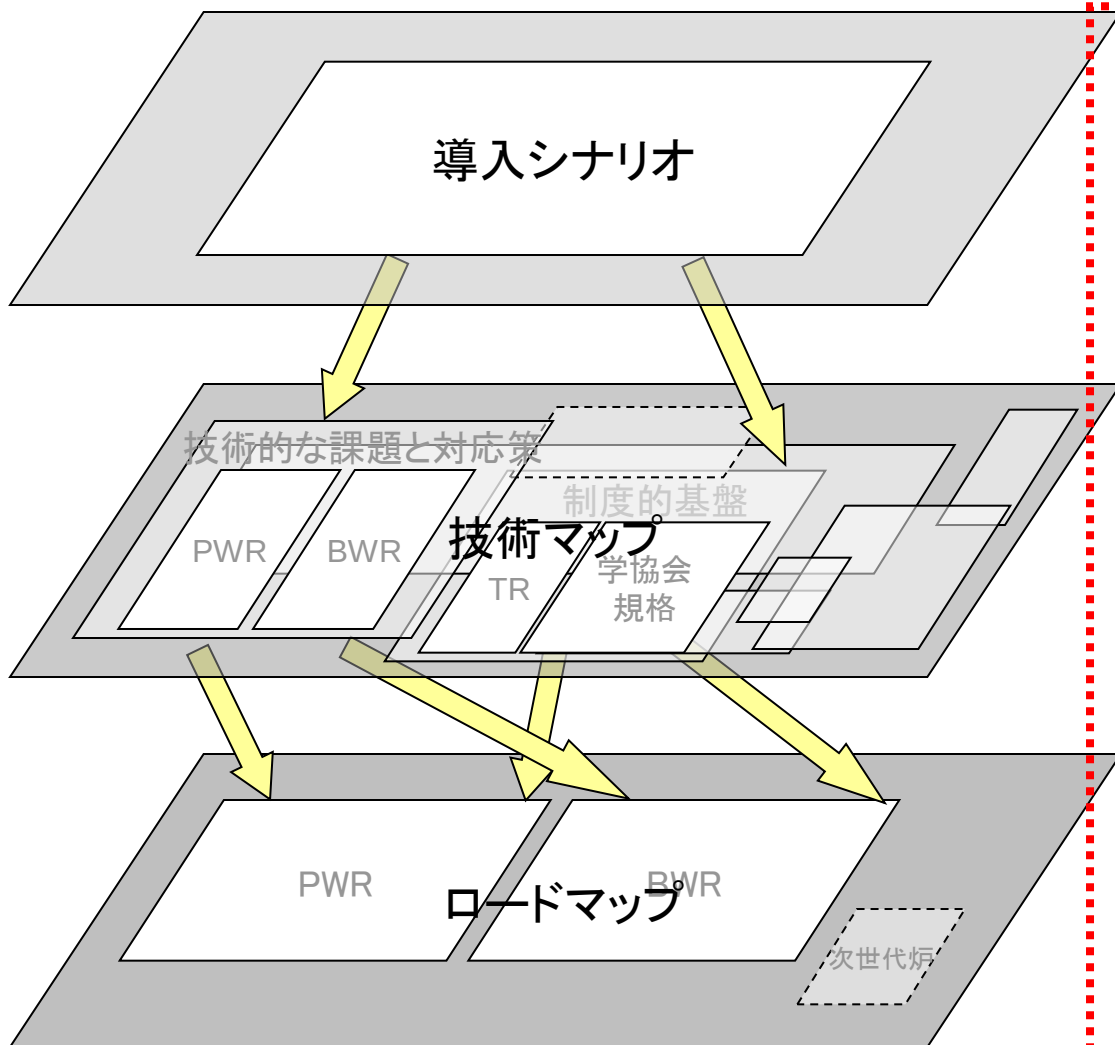
- わが国における安全対策高度化の研究と技術開発を進めるにあたっては、福島第一原子力発電所事故を踏まえ、対象が複雑なシステムであることを前提に、俯瞰的な視点を確保しつつ、技術課題を検討する必要がある。
- 国内のみならず、幅広く諸外国や国際機関での議論の動向を把握して、最新知見を取り込むとともに、わが国の強みを海外に発信しつつ、国際的な協調による研究開発を実施することが重要である。
- 産業界は、実質的な安全向上に資する研究開発を強化し、その成果や実績をリスクガバナンスのサイクルに組み込み、効果的に安全対策高度化に資する体制が必要である。

今後の安全研究について

日本原子力学会原子力安全部会福島第一事故報告書(2013.3発行)より

- 研究を実施する者は、自らが得意とする分野を深めようとするものである。一方、安全は多くの分野・領域の隙間から破綻する。
- 俯瞰的な視点を維持して、研究計画を立案し、その成果を生かすことが重要。
 - 原子力安全の目標を達成するためには、あるべき姿を議論し、現在の技術を直視することによって、取り組むべき俯瞰的な技術課題のマップを準備する。これらの課題解決のために短期的視点のみならず中長期的なロードマップを提示してゆく。
 - 国内外の運転経験を分析し、国際的な研究成果を取り込んで、ロードマップを継続的に改訂し、改善を進めるための基盤とする。
 - 異分野の研究者間、産業界と規制当局間、研究者と実務者間、さらに国民との間で様々なコミュニケーションが必要である。

技術戦略マップ・ロードマップの階層構造



1階層目（導入シナリオ）

課題解決のニーズや技術的、社会的背景、境界条件や不確実性を明確にし、研究・開発成果の採用の目標を示したもの

2階層目（技術マップ）

どのような課題があるかを俯瞰・整理し、産業界や国、規制、学界、学協会がどのように取り組んでいくべきかを整理したもの

3階層目（ロードマップ）

2階層目（技術マップ）に挙げられた課題を相互に結びつけながら解決に向けた取り組みやホールドポイントを時間軸上に示したもの

技術戦略マップ・ロードマップ検討の経緯(1)

－ 軽水炉の運転中安全と高経年化対策分野を例として －

- 研究開発課題の俯瞰的整理学
 - － 課題の重点化とともに科学的技術の総合的体系化を意識
 - － 短期的課題と長期的視点・課題の融合
- ロードマップ策定目標の共有化
 - － 安全研究と開発研究における共有化と差別化の精査
- 技術情報基盤の必要性、重要性
 - － ロードマップの構造化
 - － 種々のコミュニケーション:コンセンサス、プロセス透明性

技術戦略マップ・ロードマップ検討の経緯(2)

- 技術戦略マップとしての構造化とローリング
 - 導入シナリオ、技術マップ、ロードマップ
 - 導入シナリオ層での分野・領域をつなぐインタラクション定義
 - 技術マップ層での俯瞰性確保
 - ロードマップ層での短中長期整合性
 - 評価システムの組み込み
- 役割分担と責任の定義
 - 産業界、行政・規制、学術界に加え、学協会の役割を明示
 - 学協会は学協会規格策定の場合、産官学が集い議論するオープンな場
 - 規制のための知識基盤と産業界による情報基盤の関係
 - 施設基盤・人材基盤・資金基盤につながる重点化・成果評価
- 規格・基準化、ガイドライン化
 - 研究開発のアウトプットとしての様々なレベルでの標準化
 - 現場での活用のための課題

技術戦略マップ2007

- 日本原子力学会燃料高度化特別専門委員会(2006.4～2008.3)
- 技術情報調整委員会(JNES)安全研究WG等

技術戦略マップ・ロードマップ検討の経緯(3)

- 多様な情報共有とコミュニケーションの場としての活用
- ローリングサイクルと質の確保の課題
 - 課題の細分化と総合化に応じたローリング体制
 - 課題の実践と成果の自己評価
 - 共有目的に基づいた技術戦略マップの第三者的評価
- 安全研究の自律分散協調系
 - 研究遂行組織を横断する総括的マネジメント
- 技術戦略マップの国際化
 - 国際協調、共同作業の取込みと国際競争力確保
- 人材育成と教育システム

技術戦略マップ2008、2009、2010の策定

- 日本原子力学会核燃料部会燃料高度化ロードマップ実行委員会
- 技術情報調整委員会を基軸とし、産業界のPLM研究推進会議と高経年化対策強化基盤整備事業総括検討会を含む体制

付録1 参照

技術戦略マップ・ロードマップ検討の経緯(4)

- 現在の技術マップ、ロードマップ策定のための学会等での検討組織化
 - 日本原子力学会 「安全対策高度化技術検討」特別専門委員会
 - 「安全対策高度化技術基盤整備事業」 技術マップ策定部会
- シビアアクシデント対策に関する技術マップ策定を先行
- 海外の研究開発体制や組織的取組、事故を受けた研究開発課題や体制の変化、人材の育成のポイント
 - 米国(NEI, DOE, NRC 等を含む)
 - 仏・イギリス・ドイツ等及びEU
 - IAEA、OECD/NEA
- 国際シンポジウムの開催(2013.3.5 東大)
1st International Symposium on Safety Measure Improvement and Technical Basis Development for Nuclear Power Plants in 2013
 - EU SARNET、DOEプロジェクトやFLEX等、OECDプロジェクト等の講演
 - パネルディスカッション

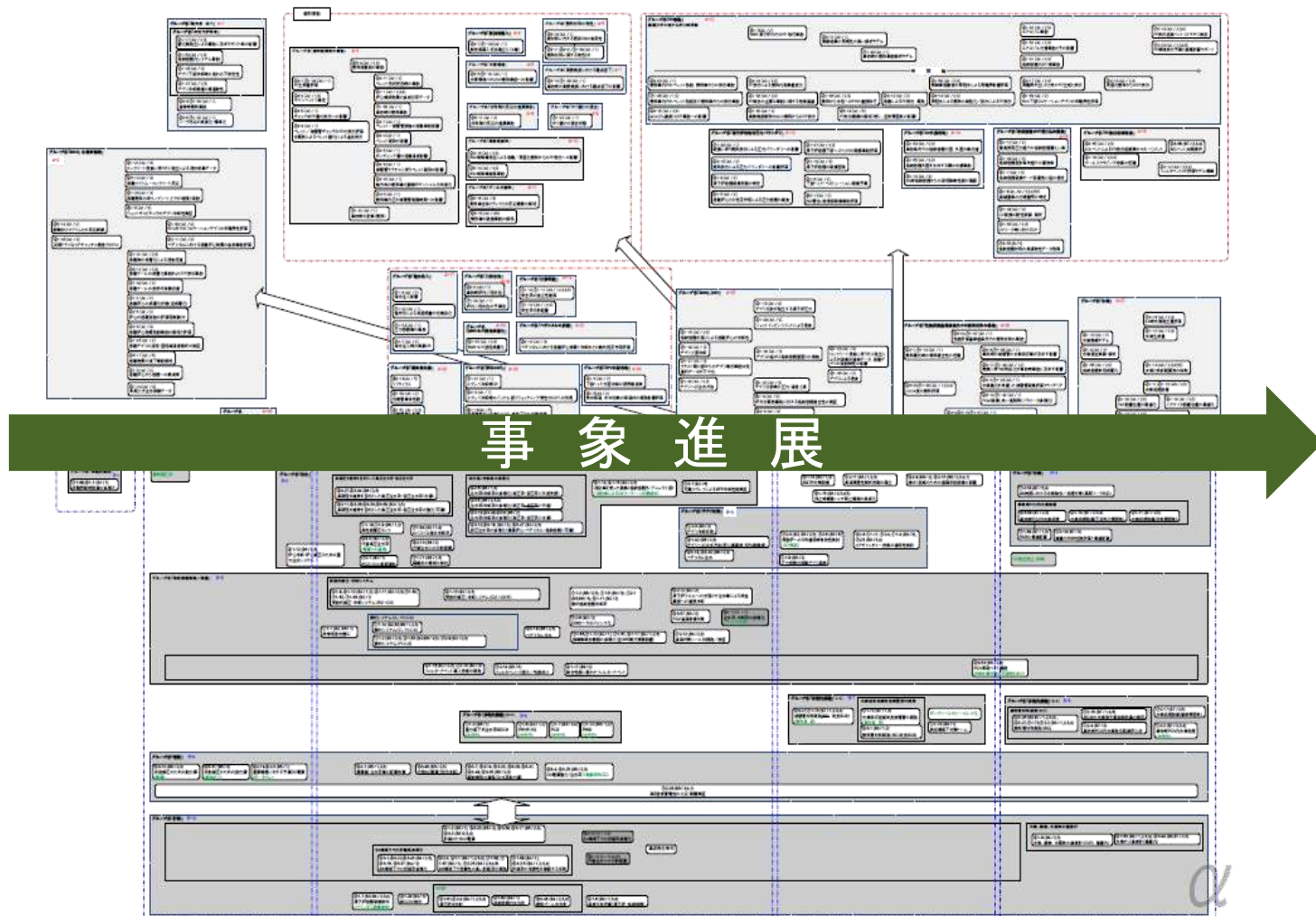
付録2参照

シビアアクシデント関連研究開発課題検討マップの検討例

日本原子力学会 「安全対策高度化技術検討」特別専門委員会

要となる
能力・知識
A・マネジメントに必

必要となる
支援機能
B・マネジメントに



外的事象を第3の検討軸として加えて、防災と地域や外部との連携や支援等に必要となる課題について検討中

安全研究・開発の組織的取組み 1

オールジャパンでの取組み

- わが国としての安全研究・開発に広く関わる技術マップ・ロードマップ策定
 - 規制機関が対象とする安全研究
 - 産業界が自主的に行うべき研究開発、ガイドライン
 - 公的研究機関や学術界が行う研究開発、基盤研究
 - 学協会規格基準策定作業
 - 国際的な共同研究、国際機関での研究プロジェクト等
- 研究開発計画と成果に関する総合的・多面的な評価
 - 原子力安全の目的に基づき課題の見直し、課題の重点化を行えるよう、自律的・包括的な評価システムとが必要。
 - 原子力利用の展開のあり方やその社会的影響に関する人文社会科学的な研究と並行して進められるべき。
 - オープンなコミュニケーションと第三者的評価が求められる。
 - 科学的・合理的な根拠に基づいた提言

安全研究・開発の組織的取組み 2

産業界での総括的取組み

- 安全性向上のためのリスクマネジメント、リスクガバナンスのための枠組みを動かすためには、以下の観点から戦略的な意思決定を行い、実行できる強固な組織が必要(米国のNEIに相当)
 - 科学技術的な基盤に基づいて研究開発成果を安全向上に活用
 - 安全の目的に基づいた産業界全体の監視、調整
 - 安全規制への対応、法制への対応
 - その下での課題の広範な課題のカテゴライズやマネジメント、リードすべき組織のコーディネーション・コミュニケーション

リスク・ガバナンスの枠組み

リスク意思決定・対応

プレ・アセスメント

- ・ 問題枠組み設定
- ・ 早期警告(新たなハザードの調査)
- ・ スクリーニング
- ・ 科学的な方法論や手順などの決定

知識生成・評価

リスクマネジメント

実施

- ・ オプションの実現化
- ・ モニタリングと制御
- ・ リスクマネジメント活動のフィードバック

意思決定

- ・ 対策オプションの同定と生成
- ・ オプションの多面的分析
- ・ オプションの評価と選択

- ・ 技術の選択
- ・ 代替のポテンシャル
- ・ リスク便益の比較
- ・ 政治的な優先度
- ・ 補償のポテンシャル
- ・ コンフリクト管理
- ・ 社会的動員のポテンシャル

(IRGC, 2007に基づく)

コミュニケーション

リスク評価

リスクアセスメント

- ・ ハザードの同定および推定
- ・ 暴露評価と脆弱性評価
- ・ 定量的・定性的リスク推定

関心事アセスメント

- ・ リスク認知
- ・ 社会的関心事項
- ・ 社会経済的影響

リスクプロファイル

- ・ リスク推定値
- ・ 推定値の信頼幅
- ・ ハザードの特徴
- ・ リスクの心理的認知
- ・ 合法化の範囲
- ・ 社会的、経済的な含意

深刻度の判断

- ・ 法的要求事項への適合性
- ・ リスクトレードオフ
- ・ 公平性への影響
- ・ 社会的受容性

リスクの特徴づけ／判断

リスクの判断

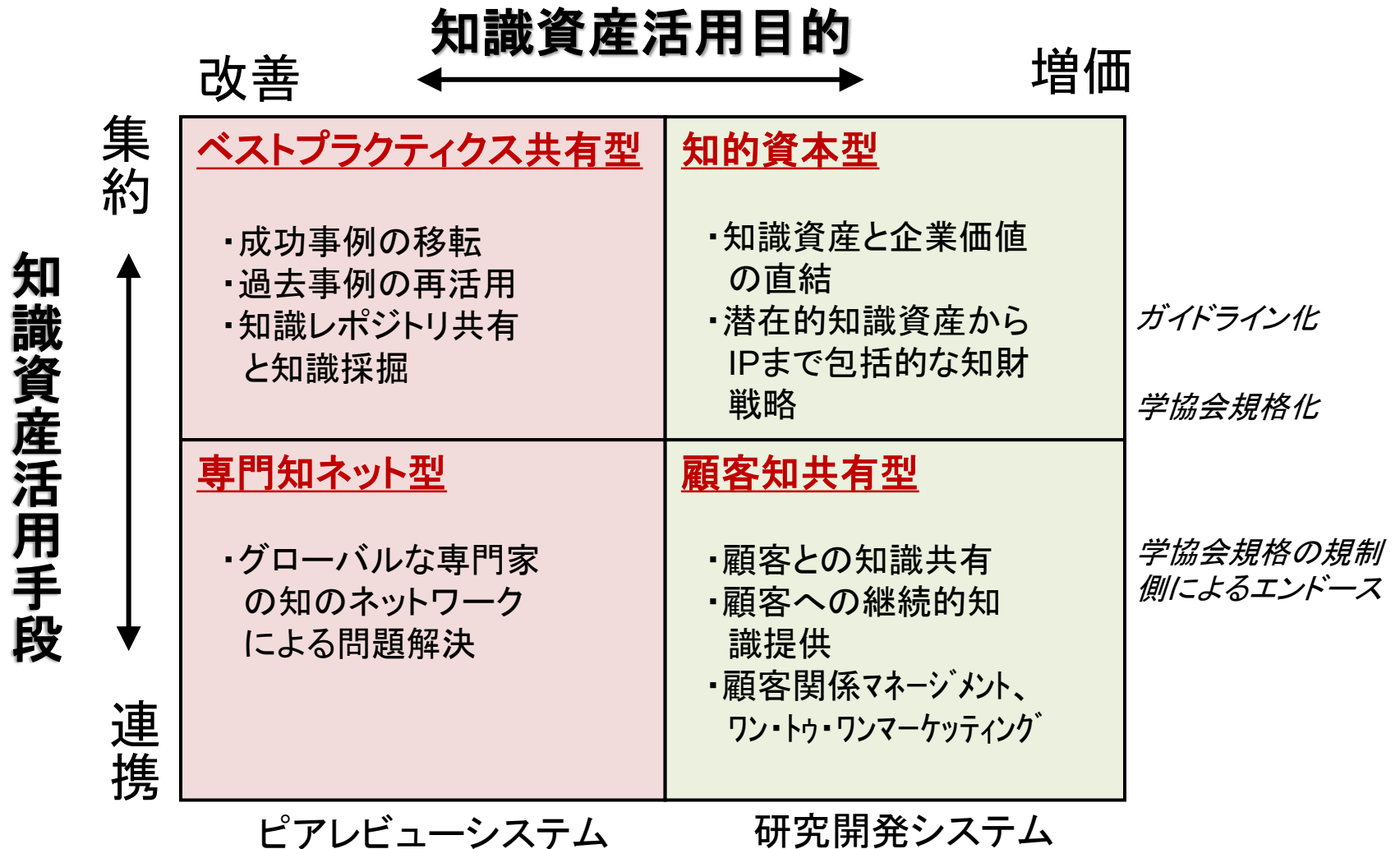
- ・ 受忍性及び受容性の判断
- ・ リスク削減対策のニーズの決定

リスクの特徴付け

- ・ リスク・プロファイル
- ・ リスクの深刻度の判断
- ・ 総合化とリスク削減オプション

研究開発とピアレビュー

知識マネジメントのタイプの観点から



安全研究・開発の組織的取組み 3

産業界での総括的取組み

- リスクガバナンス上の問題点や様々な不確実性を踏まえ、我が国の技術的特性、安全文化の深層的構造に根差した組織的な取り組みを進めることが重要
- 我が国に合致した実効的なリスクガバナンス、ピアレビュー技術、「安全文化」の評価は、着実に進めるべき(研究)課題
 - － 課題の設定と研究を進めるための組織・機関のコーディネーション
 - － 研究開発、運転経験知識ベース化、プラントごとのピアレビューシステムの総合的活用
 - － ベストプラクティスの共有化や個別の技術支援
 - － 訓練・資格認証、人材養成
 - － 成果規格化支援(ガイドライン、技術レポート)
 - － 国際的な研究、知識ベース構築や機関等との戦略的協調

付録3参照

安全対策高度化のための研究開発に関する 付加的コメント

- 研究開発のフロントローディング
 - 安全に係る目標の不確実性に対処できる情報基盤、シミュレーション技術によるフロントローディング
 - 優れた機能を実現するためのシステム統合化
- 技術の陳腐化マネジメント
 - 設計・製造・建設・運転・保全・廃棄のライフサイクル期間の課題を見通す大規模複雑システムの長期間システム安全技術マップ
 - 現存システムと機器の陳腐化 (Obsolescence Management)
- 人材確保、育成

(日本学術会議報告書「巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える分科会」(平成23年8月2日))

 - 工学の専門分野における分析能力
 - 複雑な現実の課題を数理的、実証的にアプローチが適用できる形にモデル化し、解決に導く能力
 - 俯瞰的視点とシステム思考に基づき、戦略的に意思決定を行える能力
 - 問題の本質を領域横断的、俯瞰的、体系的にとらえるシステム思考能力
 - 国際的な戦略性
 - 俯瞰的視点に立脚した先端的要素技術の開発、あるいは革新的システムの創出を行える能力

まとめ

- わが国としての安全研究・開発に広く関わる技術マップ・ロードマップ策定が望まれる
- これに基づく計画と成果に関する総合的・多面的な評価と各種のコミュニケーションが必要
- 研究開発成果を実効的にするため、リスクマネジメント、リスクガバナンスのために意思決定を行う強固な産業界組織が必要
- リスクガバナンス上の問題点や様々な不確実性を踏まえ、研究開発とピアレビューを総合的に活用する取組みが重要

付録1

従前の学協会等を中心とした、技術戦略マップ策定と継続的改訂例

高経年化対応技術戦略マップ策定の例

高経年化対応技術戦略マップ

- 目的:
 - 安全第一を旨として、プラントの供用期間に関係なく、一定の安全水準を確保するため、プラントの長期間の供用に伴う経年劣化の特徴を把握して、これに的確に対応した運転プラントの保守管理を達成及び次世代プラントの設計・建設に寄与すること
- 産官学の関係者が集合し、以下の観点から技術戦略マップの策定、定期的な自己評価、見直し作業(ローリング)を行うとともに、情報発信を行う
 - － 優先的に取り組む課題の明確化
 - － 合理的・効率的実施を考慮した役割分担の検討
 - － 検討作業、情報発信を通じたコンセンサスの形成

高経年化対応技術戦略マップの構成

原子力発電プラントの高経年化に対する
安全性・信頼性確保の達成

技術情報基盤
の整備

経年変化技術情報
データベース

包括的
経年管理
プログラム
構築

国際
規制関連
情報
データベース

安全基盤研究
の推進

検査 材料経年変化
評価技術

照射脆化
予測手法の
高度化

照射誘起
応力腐食
割れ評価

規格基準類
の整備

規格基準化

新技術
適用
スキーム
構築

プラント
性能指標
調査

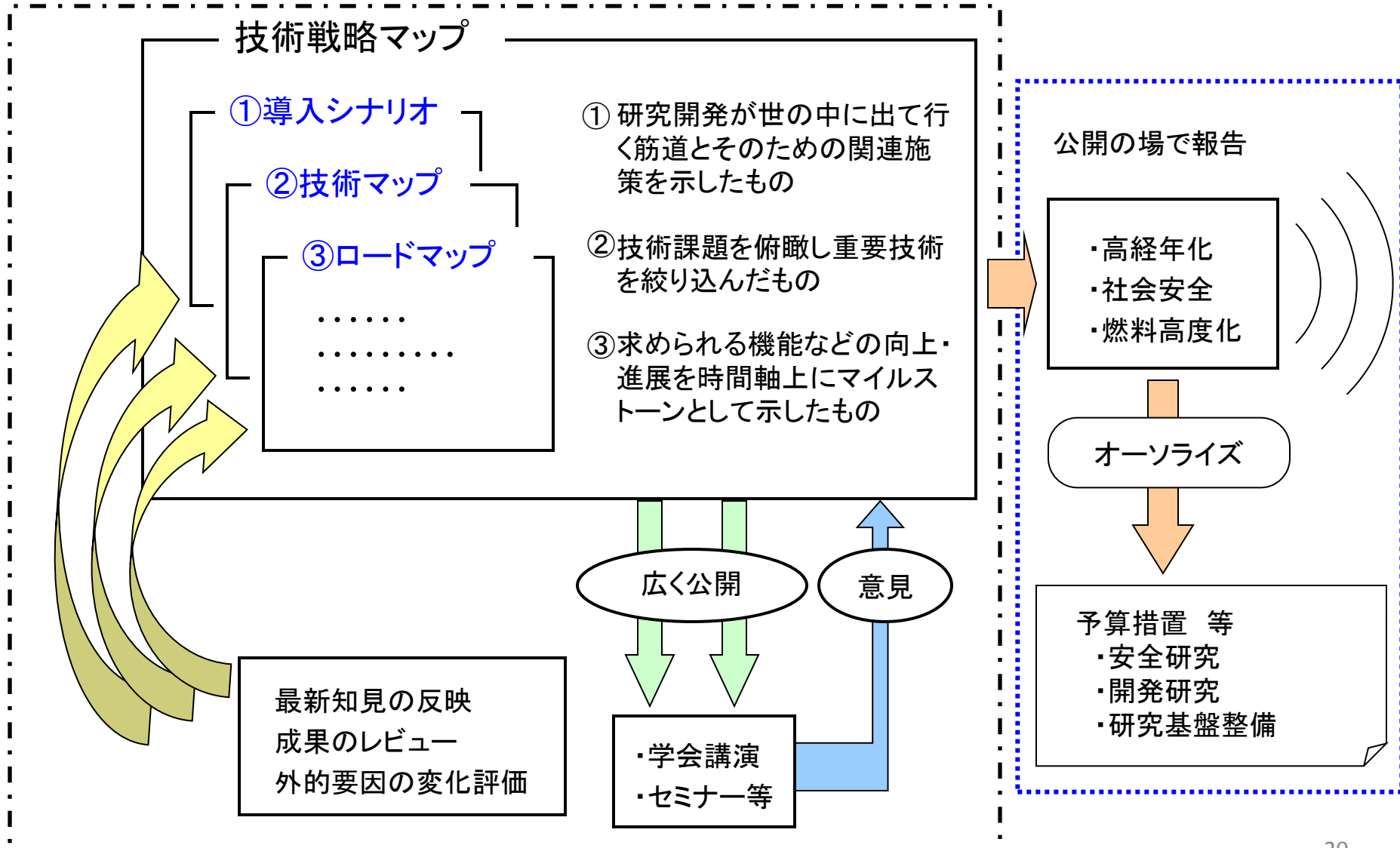
保全高度化
の推進

保全最適化

リスク
ベース
保全手法

人材確保
・育成

技術戦略マップの作成と展開



高経年化対応技術戦略マップ

－4大項目毎の技術マップ策定－

4. 保全の高度化

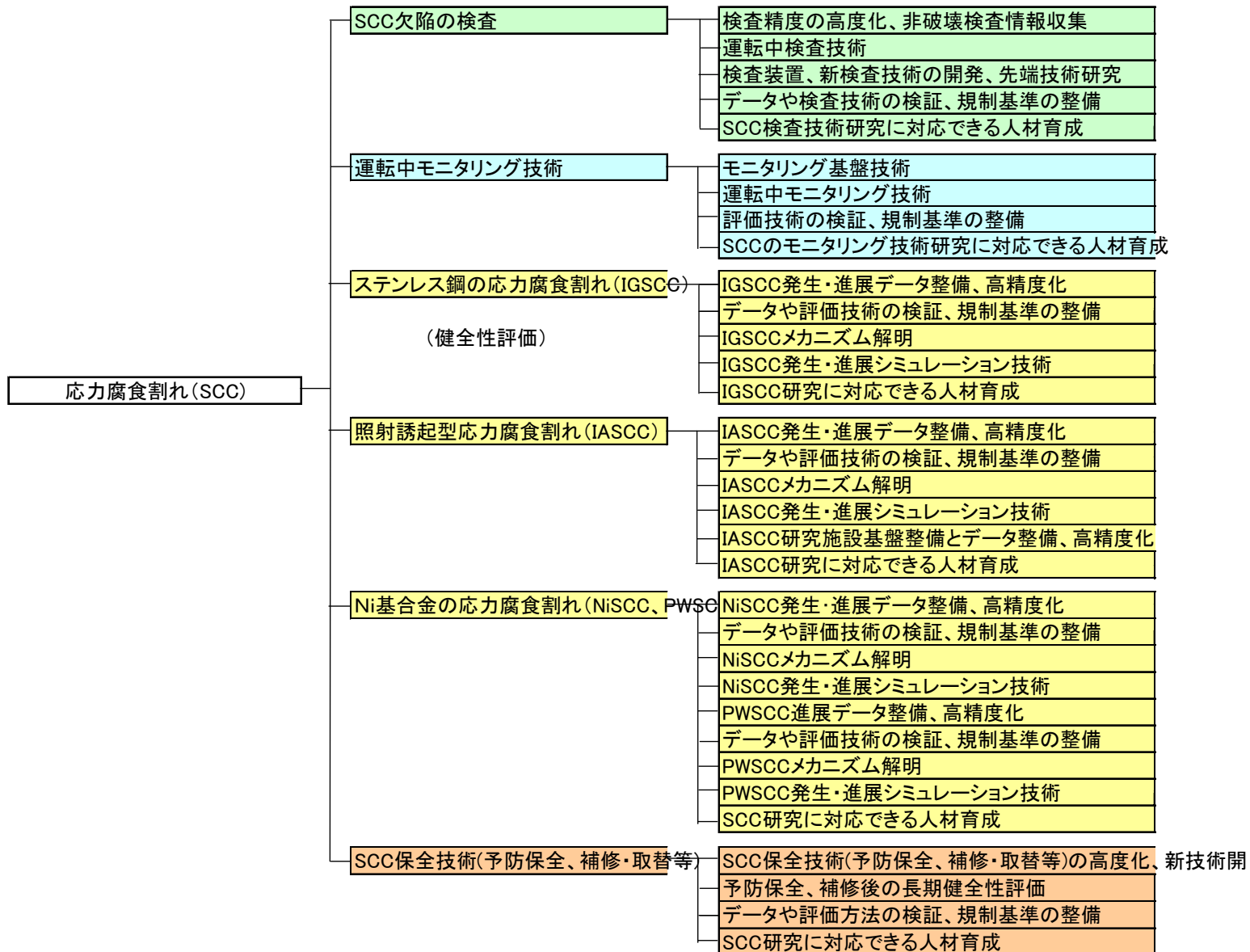
3. 技術情報基盤の整備

2. 規格基準類の整備

1. 安全基盤研究の推進

経年劣化事象	現状	40年超運転	長期・次世代炉
照射脆化	プラントデータに基づく経験則	機構論的脆化予測法の充実、監視技術の充実	これまで運転実績に基づく高度化設計
応力腐食割れ	使用材料毎の対応データベースの構築	耐SCC材の確認知識ベースの構築	シミュレーション評価法の確立 ISI技術の高度化
疲労	使用材料、環境毎の対応、データベースの構築	使用材料、環境毎の対応、データベースの構築	使用材料、環境毎の対応、データベースの構築
減肉	対象箇所毎の対応データベースの構築	メカニズムを踏まえた予測法の確立 リスクベース保全確立	監視技術の高度化
ケーブルの絶縁劣化	使用材料毎の対応データベースの構築	劣化診断技術の高度化	監視技術の高度化
コンクリートの強度低下等	知見が不足している分野の重点研究	健全性評価手法の信頼性向上と高度化 CCVの健全性評価手法の確立	新規プラントの保守技術 耐久性設計への実績反映 リプレイス時の構造物・材料の再利用法確立

応力腐食割れ(SCC)に関する技術マップ構造



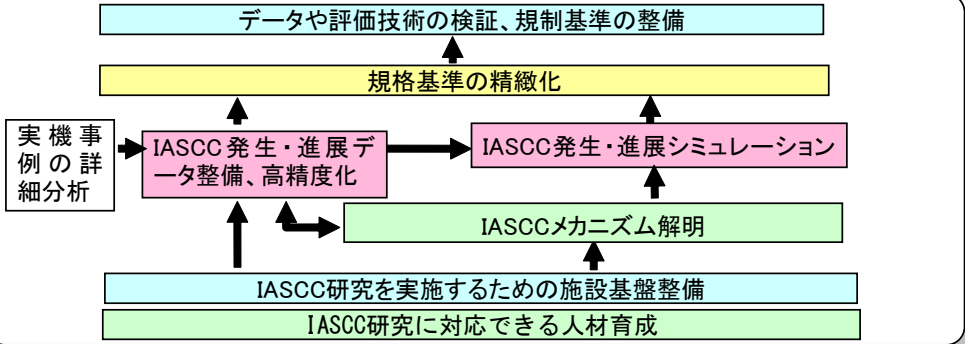
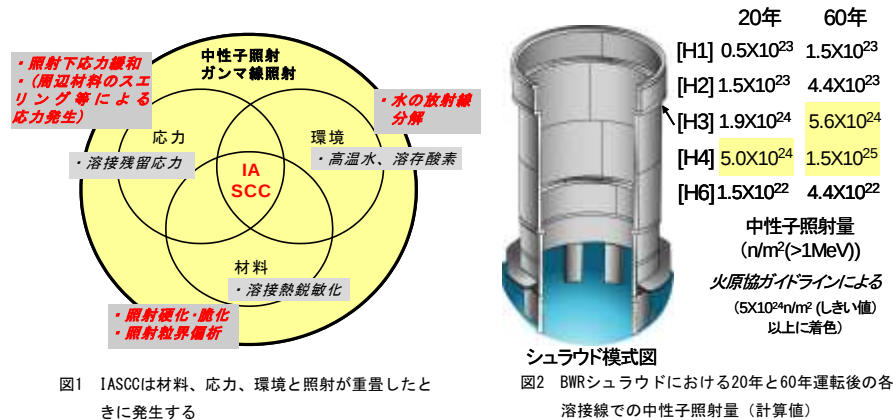
照射誘起応力腐食割れ(IASCC)に係る導入シナリオ

照射誘起応力腐食割れ(IASCC)とは

- ・中性子照射量がしきい値を超えて増大するとステンレス鋼のIASCC感受性が増大し、炉内構造物のIASCC割れが発生しやすくなる。
- ・鋭敏化しない低炭素ステンレス鋼でも発生する。
- ・IASCCはSCCの3要素 材料、環境、応力にさらに中性子照射の影響が重畳した複合事象と考えられている(図1)。
- ・BWR環境とPWR環境両方で発生する可能性がある。

高経年化対応研究方針

炉の高経年化に伴う中性子照射量増加に対応するIASCC発生・進展データ整備、高精度化を実施し、同時にIASCCメカニズム解明を推進して、IASCC発生・進展を予測するシミュレーション技術の開発、実機適用を進める。それらの成果を反映して規格基準の精緻化、また、科学的合理性を持った規制基準の整備等に繋げる。そのために必要なIASCC研究を実施するための施設基盤整備とIASCC研究に対応できる人材育成も行う。



現状分析

原子炉の高経年化に伴い、炉内構造物の中性子照射量が増大し(図2)、IASCCの発生する可能性がより高くなると考えられる。現在までに、BWRでは、高照射量を受けた制御棒で発生が報告されている。また、PWRにおいては、国内でIASCC事例は報告されていないが、海外では高照射で高応力が負荷されるパッフルフォーマボルトに多数の事例が確認されている。以上の状況から世界的にもIASCC現象が目立っており、研究が活発化している。現在、国の事業としてIASCCき裂進展データを検証して規制基準の整備が実施中である。また、国際協力によるメカニズム研究も行われており、JAEA等の研究機関が参画している。

しかし、今のところIASCCの発生・進展に関するデータは乏しく、メカニズムに関しても確定されていない。現在、IASCCき裂進展予測精度の向上に資するため、SCCに対する照射の影響に関する評価研究を放射線分解水質および照射速度等の観点から実施している。今後、高経年化原子炉の安全性、信頼性を確保するためには、IASCC発生・進展に関するデータ充実と高精度化が不可欠である。また、IASCCメカニズムに関する理解を深めて、IASCC発生・進展の予測が行えるIASCCシミュレーション技術の開発が急務である。それらの研究を推進するために、JMTR等の施設基盤の整備が重要で、また、IASCCの研究に携わっている人的資源も十分でないことから、IASCC研究を推進する幅広い知識を持った人材育成にも注力する必要がある。

産学官の役割分担

①産業界の役割

—安全性、信頼性、経済性の確保
向上を目的とした開発研究および
基盤整備

- ・IASCC発生・進展データ整備、高精度化
- ・IASCC発生・進展シミュレーション技術
炉内構造物のIASCC発生・進展を予測する
方法の開発と実機適用
- ・IASCCメカニズム解明(共同研究の主体者)

②国・官界の役割

—安全規制における適正な行政判
断に必要な安全研究
—必要な基盤(知識、人材、施設、
制度)の整備
—産学の安全に関わる研究と基盤
整備に対する支援

- ・データや評価技術の検証、規制基準の整備
学協会規格のエンドース、健全性評価ガイ
ド策定
- ・IASCC 研究を実施するための施設基盤整
備(共同研究の主体者)

③学術界の役割

—知の蓄積と展開(安全基盤研究
の検証)
—研究を支える人材の育成

- ・IASCCメカニズム解明(共同研究の主体者)
- ・IASCC発生・進展シミュレーションの基礎技術
- ・IASCC研究に対応できる人材育成(共同研究
の主体者)
- (・規格基準の精緻化支援)

④学協会の役割

—規格基準化とその高度化に貢献

- ・規格基準の精緻化

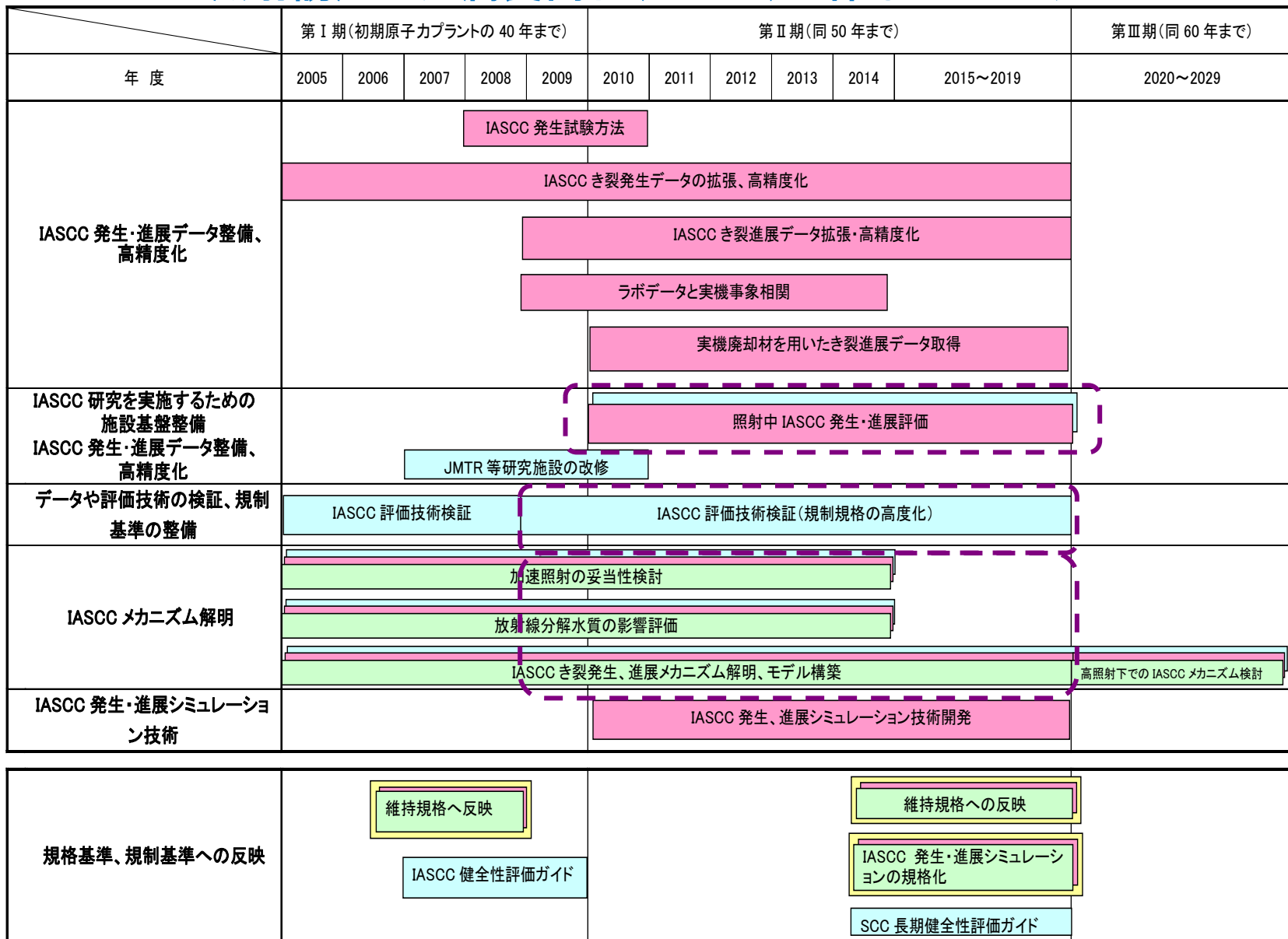
産学官の連携

産学官による協
調・共同研究が必要
な研究課題

- ・IASCCメカニズム解明等
メカニズム解明や発生・進
展シミュレーション技術は科
学的合理性の基礎となり産官
ともに必要で、学の研究ポテ
ンシャルを踏まえて産学官で
共同して効率化する。
- ・IASCC研究を実施するた
めの施設基盤整備
IASCC研究には照射を伴う
研究が必要なことから、JMTR
等の照射施設基盤整備を産
官で協力して推進する。
- ・IASCC研究に対応できる
人材育成
産学官の人的交流を図り、
IASCC研究に対応できる幅広
い能力を備えた人材を育成す
る。

高経年化対応技術戦略マップ2009

― 照射誘起応力腐食割れ (IASCC) に係るロードマップ ―



役割分担: ■ 産、■ 官、■ 学、■ 学協会

高経年化に対応する技術戦略マップの従前のローリング体制

原子力安全
基盤小委員会 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会

高経年化対応
技術戦略マップ 報告

技術情報調整委員会

【情報基盤WG】-【安全研究WG】-【国際協力WG】
【アドホック委員会】

連携

連携

JNES
各種技術検討会※1

- ・学識経験者
- ・電気事業者
- ・原子炉製造メーカー
- ・原子力安全・保安院
- ・JAEA
- ・JNES
- ・その他

連携

総括検討会

個別検討会※2

東日本クラスター

東北・北海道
クラスター

福井クラスター

茨城クラスター

産学官・学協会による検討会

高経年化対策強化基盤整備事業

連携

PLM研究
推進会議※3

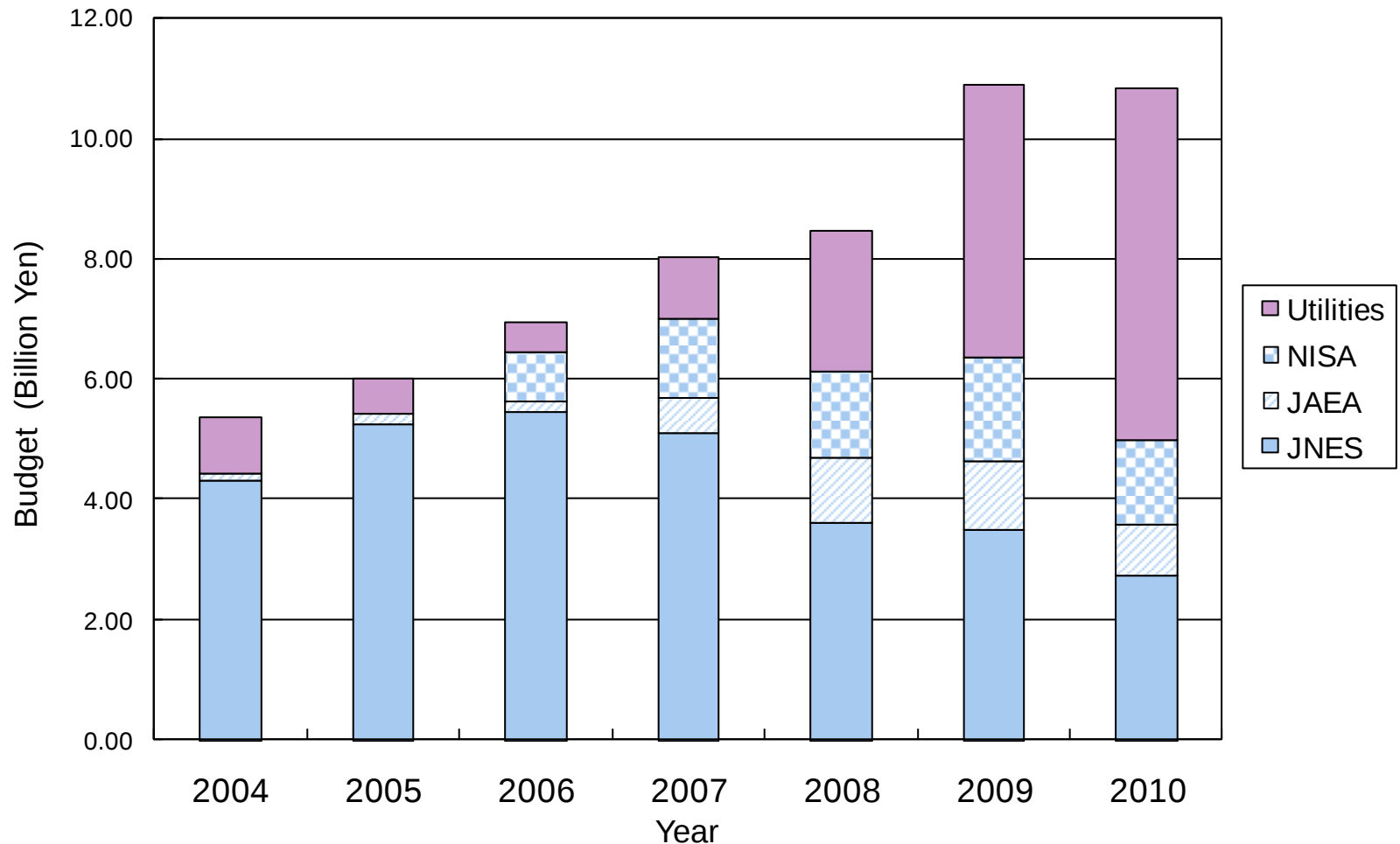
9 電力
日本
電 源
原 開
電 発
東 芝
日 立
三 菱
重 工
業
電 中
研
原 技
協

※1 照射脆化、応力腐食割れ、材料
評価技術、検査評価技術、ケー
ブル・電気計装設備、補修技術

※2 技術情報基盤(含む疲労)、配管減肉、検査・補修技術
コンクリート劣化、照射脆化、応力腐食割れ、ケーブル劣化

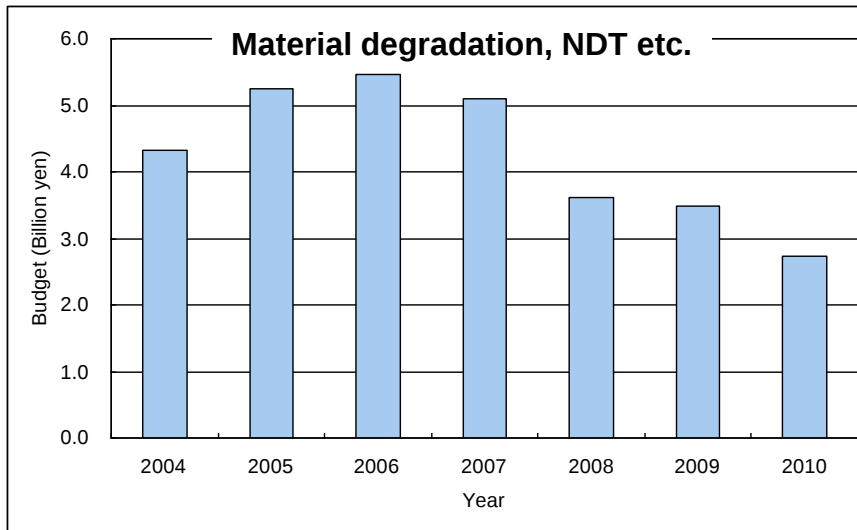
※3 応力腐食割れ、照射脆化、疲労、耐震安全、コ
ンクリート劣化、ケーブル絶縁劣化、配管減肉、検
査・モニタリング、予防保全・補修技術、保全の高度
化等

国内の軽水炉高経年化対策関連安全研究予算 2004-2010

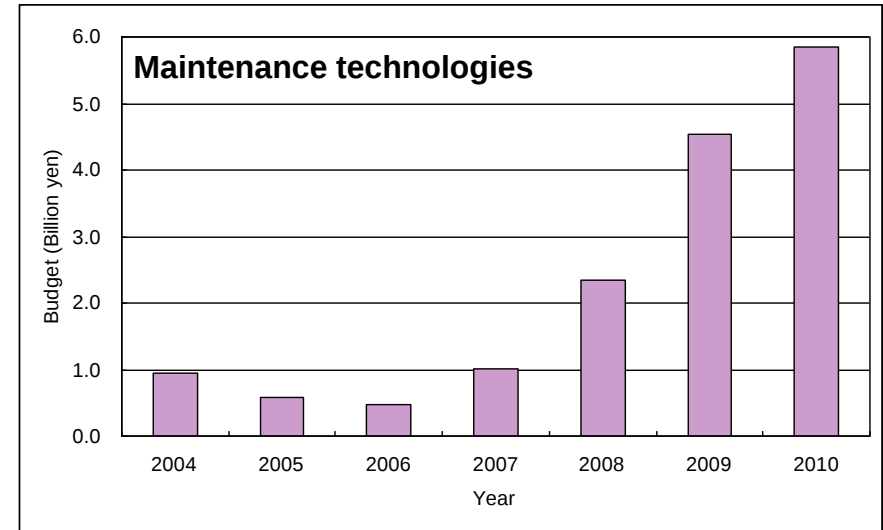


国内の軽水炉高経年化対策関連安全研究予算 2004-2010

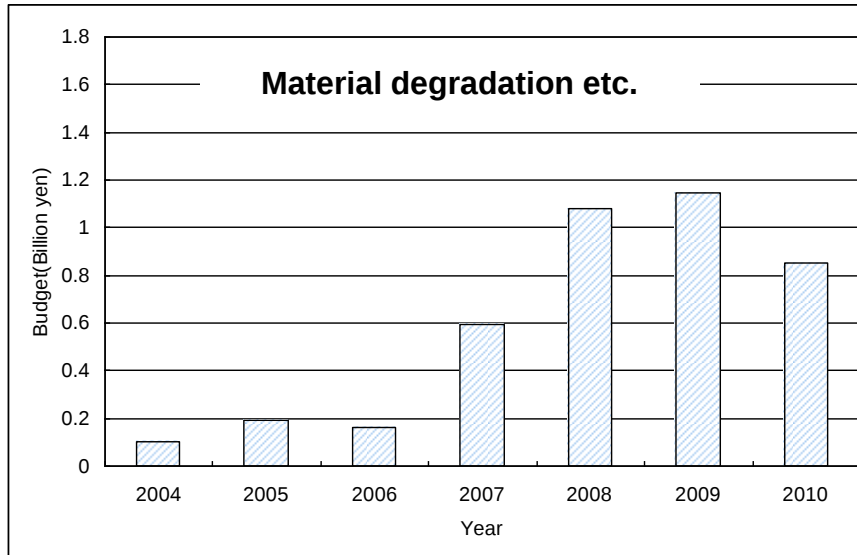
JNES Safety Research Project



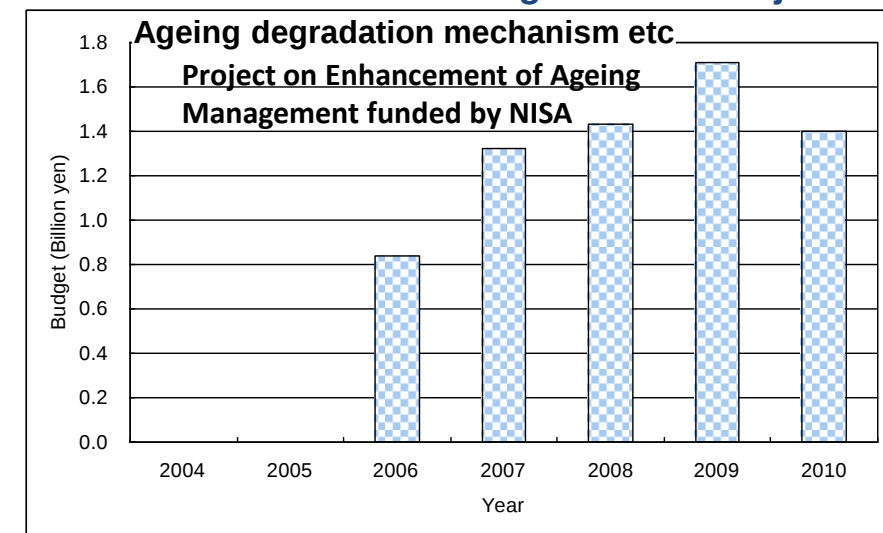
Utilities Joint Research Project



JAEA Safety Research Project



Academia & Research organization Project

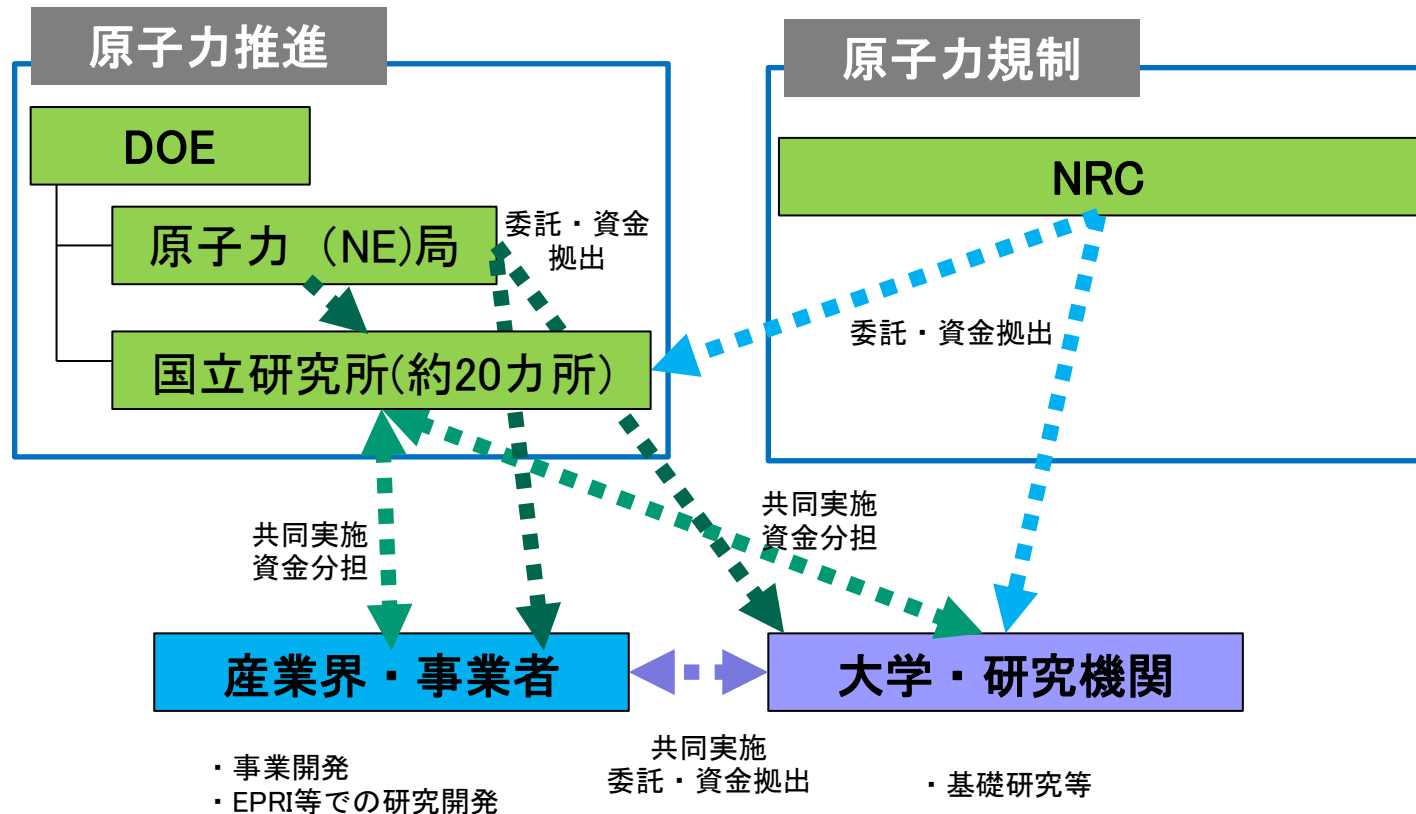


付録2

各国・国際機関等での研究・技術開発の包括的取組調査の一例

日本原子力学会 「安全対策高度化技術検討」特別専門委員会
「安全対策高度化技術基盤整備事業」 技術マップ策定部会
での調査結果に基づく

米国の安全研究と関連研究開発体制



共同、協調と情報交換、コミュニケーションの体制が整備されている

米国NRCの原子力安全研究

安全研究に関する戦略目標

戦略計画（2008－2013）の2012年更新版による

- 永続的な安全性の確立、喫緊の安全課題の同定及び解決へ向けた研究プログラムの実行、最新技術の安全性理解のための長期的な研究への関与
- 福島事故から得られる教訓の評価
- リスク重要度や一般的な適用性に関して国内外の事象や傾向を評価

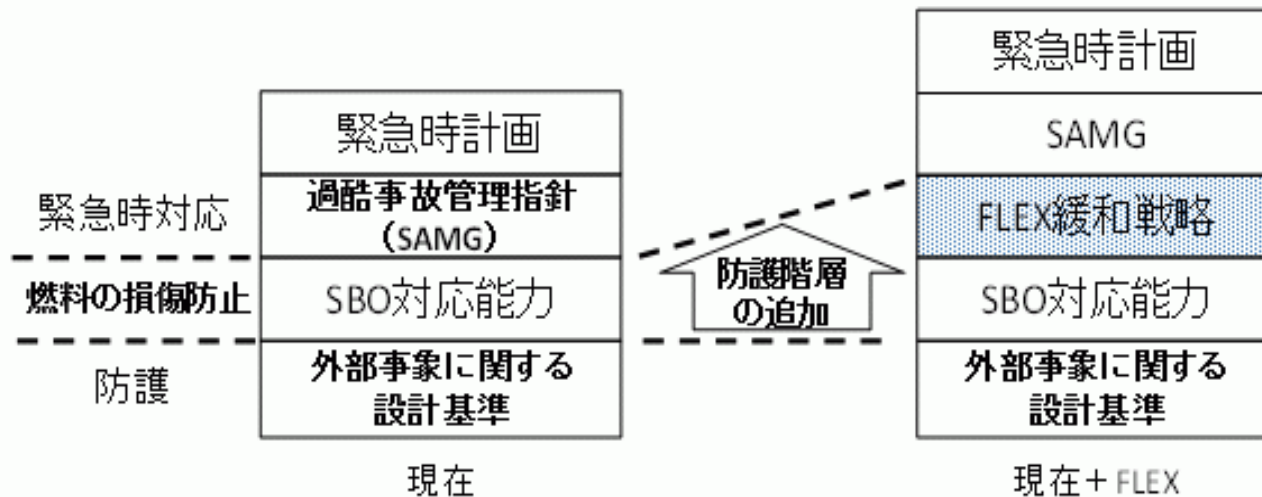
米国NRCによる福島事故後の 安全性向上へ向けた対応

短期タスクフォースでの提言

テーマ		提言内容
規制枠組みの強化	提言1	深層防護とリスクの再評価、論理的かつ系統的で一貫性のある規制の枠組みの確立
確実な防護	提言2	原子炉の構造物・系統・コンポーネント(SSC)の地震及び浸水に関する設計基準の再評価及び強化
緩和能力の強化	提言3	地震で誘発される火災や浸水を防止・緩和する能力の増強
	提言4	全交流電源喪失(SBO)緩和能力の強化
	提言5	Mark I型、Mark II型格納容器をもつBWRプラントにおける強化ベントの導入
	提言6	格納容器内部や他の建屋内部の水素制御・緩和に関する知見の特定
	提言7	使用済燃料プールの冷却水補給能力とプールの計装の増強
緊急時対応の強化	提言8	緊急時運転手順書(EOP)、過酷事故管理指針(SAMG)、大規模被害緩和指針(EDMG)などの所内の緊急時対応手順の強化・統合
	提言9	長時間のSBOと複数基の事象への対応の緊急時計画への組み込み
	提言10	複数基の事象と長時間のSBOに関係する緊急時対応の検討
	提言11	意思決定、放射線モニタリング、公衆教育に関係する緊急時対応の検討
NRCプログラムの効率改善	提言12	深層防護の枠組み提言を踏まえたROPの強化・修正

米国の産業界によるFLEX戦略

- 柔軟性と多様性を備えた事故緩和戦略であるFLEXアプローチを提案
- 一律の対策ではなく、それぞれのプラントの状況や危険性に応じた安全向上策を策定することを目的
- 基本的には既存技術を組み合わせて用いて適切な対応アプローチを策定することによって、長時間SBOや最終ヒートシンク喪失時の防護階層を増加



以下のような具体策を発表し、実行に移されつつある。

- 新たに移動可能な機器（発電機、ディーゼル発電機で稼動するポンプ、換気用ファンなど）や緊急時対応に必要な食料等を各プラントに配備
- 緊急時に必要な設備を供給するための共同地域センターを2014年8月までにテネシー州メンフィスとアリゾナ州フェニックスに設置。地域センターには、電源・冷却水喪失時に必要な発電機、ポンプ、放射線防護機器等を配備する。

米国：9.11テロ後の安全高度化へ向けた 研究・開発、規制対応（1）

- NRCは同時多発テロを受けて、全発電原子炉の許認可保有者に対して保障措置・セキュリティに関する暫定命令を発行。その後、これらの要件を許認可要件とする規則改定を実施

NRCによる規則要件の変更

1. 航空機衝突対策

- ・ 既存プラントに、航空機攻撃などの設計基準を超えた爆発や火災によるプラントの広範囲にわたる喪失に対処（炉心の冷却、格納容器の健全性、使用済燃料プールの健全性と冷却の維持）の適切な手順・戦略の策定を求める規則を2009年3月に発行
- ・ 新規原子炉の申請者に、原子炉設計が大型民間航空機の衝突による被害に耐えられる、あるいは被害を緩和できることを評価するよう要求する規則を2009年6月に発行⇒AP1000の設計変更などに反映

2. 敵対行為への対応

- ・ 敵対行為シナリオでの訓練・演習の実施（Force-on-force訓練）

3. 設計基礎脅威(DBT)の改訂

- ・ 既存のDBTに、放射能漏れを伴う破壊活動および核物質の盗取・転用、サイバー攻撃等をDBTに追加
- ・ サイバー攻撃に対するセキュリティ計画の策定が許認可要件に追加

4. 物理的防護・入出管理の強化

- ・ 安全を阻害する電子的手段を持つ人物の出入管理、情報共有、監視等の要件の強化
- ・ 警備員の訓練・認定プログラムの強化、非武装警備員の身体的な要件の追加。
- ・ 物理的セキュリティ強化。（セキュリティ組織（対応部隊）の設置、プラント内に防護区域、物理的防壁、隔離地帯等を設置、防護区域内を監視するために十分な照明の設置、中央警戒ステーション・警備員詰所の設置等）
- ・ 車両、荷物に対するセキュリティ検査の徹底、搬入の制限

5. テロ攻撃への防護、武器携帯規則策定

- ・ 独立使用済燃料貯蔵施設（ISFSI）の防護強化
- ・ 警備員が携帯する武器の強化

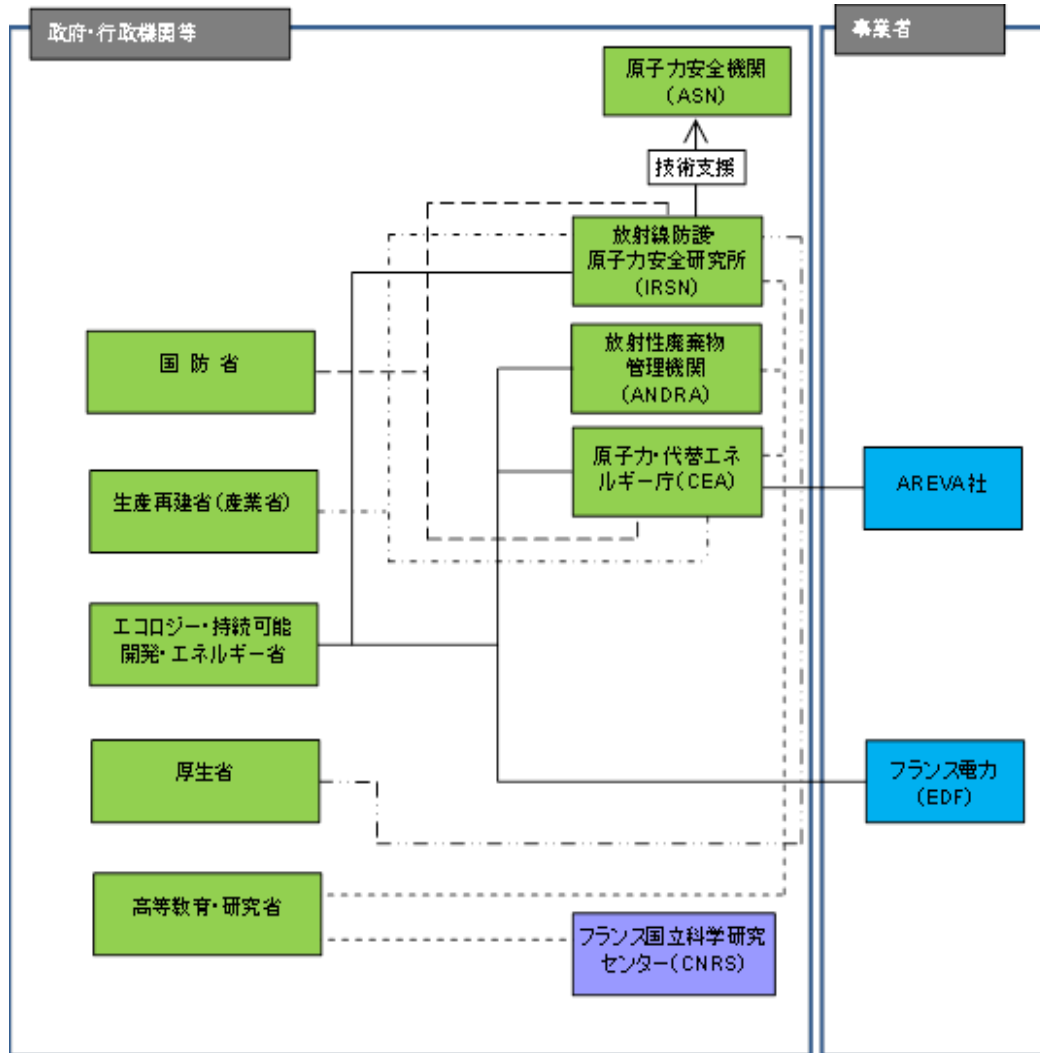
米国：9.11テロ後の安全高度化へ向けた 研究・開発、規制対応（2）

産業界の対応：NRCの規制改訂に対する具体的な対策

- 物理的防壁と照明を設置した侵入探知区域の設置
- 全米65カ所のプラントにおいて、24時間体制で防護する武装警備員を8,000名育成し、配備
- 境界フェンスの定期チェック及び巡回警備の実施
- テレビ監視システムや警報措置などの侵入検知設備の強化
- 重要区域における防弾防壁の設置
- 有事専門部隊の整備
- プラント制御システム及び安全機器制御システムのインターネットからの隔離
- サイバーセキュリティ指針の策定と実行
- サイバーセキュリティ・テンプレートの策定。現行サイバーセキュリティの評価、アナログ機器のデジタル化の際の評価、緊急事態・災害からの復旧、セキュリティ訓練の一環としての定期的な脅威・脆弱性レビューで構成
- AP1000の設計変更

飛行機の衝突事故に対する新しい規制要求に対応して、遮蔽建屋の強度を増すなどの設計変更を行い、再度2011年に設計認証を取得

フランスの研究開発体制



※ 上図は複数省庁の管轄下にあるフランスの原子力関連組織と管轄省庁との関係を、省庁ごとに異なる線(直線及び4種類の点線)によって図示したもの。

- 原子力安全R&Dを実施する主要な組織は、放射線防護・原子力安全研究所(IRSN)と原子力・代替エネルギー庁(CEA)。
- 原子力施設の許認可権限や、関係機関の管轄権限は複数の省庁によって共有される体制。
- 国としての原子力に関するR&Dの方向性を規定するような政策文書はなく、R&Dを担当する公的機関が、設置根拠法令等で規定された組織の使命に照らして、研究計画を策定している。
- 各研究機関は国に対して実施を約した研究計画に関する複数年契約を政府(管轄省庁)と結ぶ。
- 各機関には、管轄省庁等の代表者も出席し、その機関が実施する研究の方向性を監督する委員会が置かれている。

フランス原子力研究開発予算の 福島事故後の変化

- IRSNとCEAは“公的機関:EPIC”であり、活動費用は政府予算のうち「エネルギー・開発・持続可能国土整備に関する研究」向けの補助金から拠出される。
- CEAは、福島事故を踏まえて「これまで実施してきたR&Dに重大な欠落はなかった」（2012年2月に発表した原子力安全研究に関する文書）として、これまでの研究枠組みを継続する方針。
- IRSNも、「過去の研究成果が、福島事故後の緊急時対応で活用され、これまでの研究取組みが政府にも評価された」（2011年報）としている。
- 注力する研究テーマの見直しはあるが、予算額ではCEAやIRSNの研究活動の大枠や規模については、福島事故後で大きく変わっていない。
- ただし、福島事故をうけて強化すべきテーマについては、「未来への投資」の枠組みで特別予算を拠出して研究を実施する方針。

エネルギー・開発・持続可能国土整備に関する研究のうち、
CEAとIRSNの研究関連予算の福島事故前後の比較

(単位は100万ユーロ)	2011年	2012年	2013年
CEA	430.0	465.4	451.8
IRSN	144.3	141.9	138.1
政府のR&D予算総額	10,797	10,849	10,931
原子力関連予算の割合	5.3%	5.6%	5.4%

EU SARNETプログラム(1)

SARNET (Severe Accident Research NETwork of Excellence)

- フレームワークプログラムの枠組みにおいて、2004年以降実施。
- 第2期は2009年4月から48か月間で、総予算は約3,900万ユーロ、うちECの負担は575万ユーロ。
- 19の欧州諸国およびカナダ、韓国、米国の、19研究機関(JRCを含む)、8大学、8電気事業者、および7規制機関、または安全性に関係する技術機関で構成。
- 福島タスクフォースも立ち上げている。

SARNETの経緯

- 1980年代以降、フレームワークプログラム等を活用して、シビアアクシデントマネジメントで大きな前進があった。
- 第5次フレームワークプログラムで実施されたEURSAFEプロジェクト等で、不確実性低減のために研究が必要な点が指摘される。シビアアクシデントに関する研究の国レベルの予算減に直面して、専門家や施設の効果的な活用のための調整の必要性が認識される。
- 2004年4月、シビアアクシデント研究に携わる51組織が、第6次フレームワークプログラムの枠組みにおいて第1期目のSARNETを立ち上げ。主たる成果は6項目の最優先の研究課題の特定。
- 2009年4月、米国NRC、韓国原子力研究所(KAERI)も加えて、第7次フレームワークプログラムの枠組みにおいて第2期目のSARNETを立ち上げ。フランス放射線防護・原子力安全研究所(IRSN)が調整役。2010年4月には韓国原子力安全技術院(KINS)も参加。

EU SARNETプログラム(2)

SARNET1の活動内容・目的

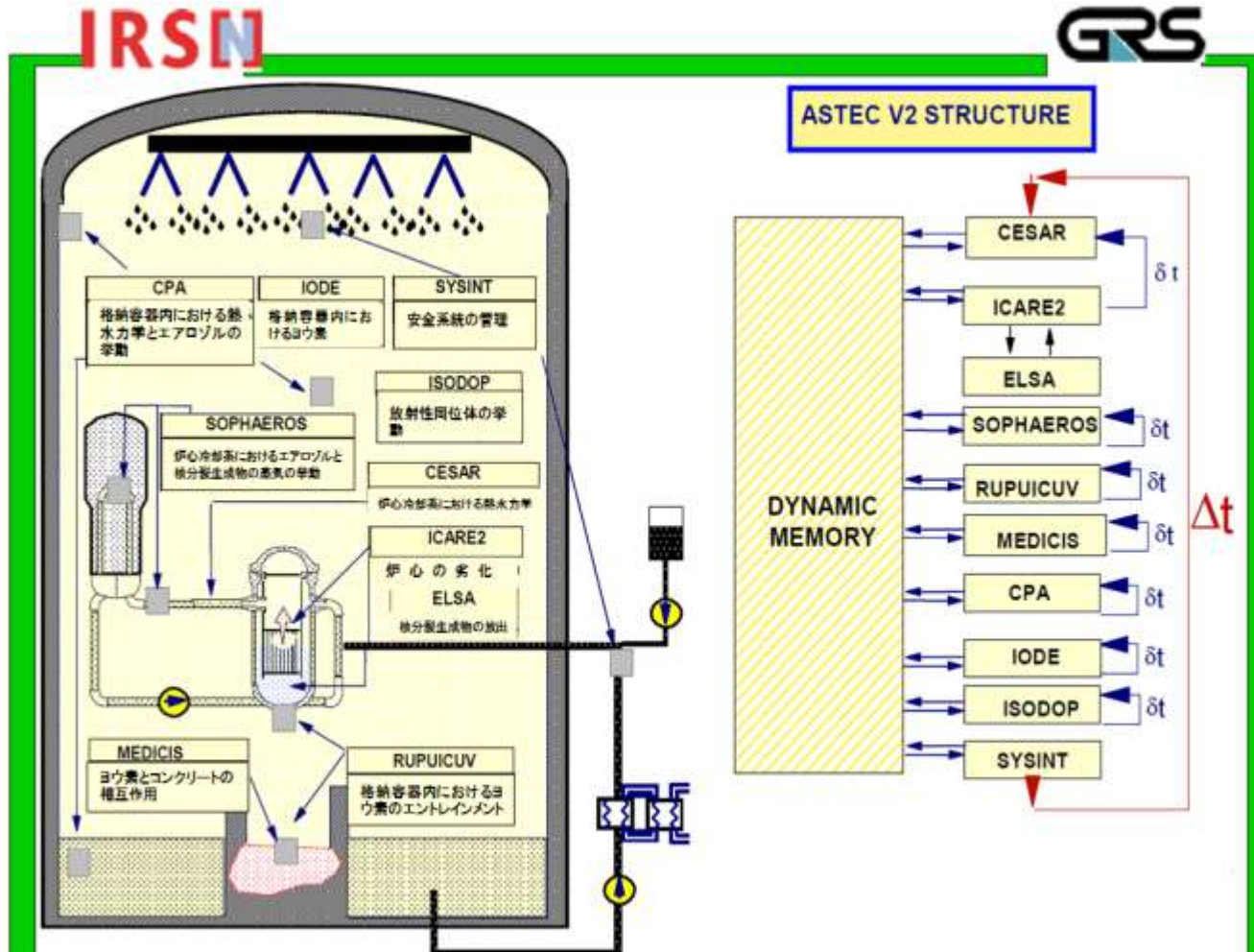
- 情報交換の促進のためのコミュニケーションツールの作成
- 研究プログラムの調整や再検討、共通的なプログラムの確定
- 研究プログラムによってもたらされる実験結果の共通での分析による現象に関する共通理解の獲得
- 事故ソースターム評価コード(ASTEC)の開発
- 研究プログラムの結果をすべて保存する科学データベースの開発
- 原子炉の確率論的安全評価の共通的な方法論の開発
- 欧州の組織間での人材交流の促進

SARNET2の活動内容

- 研究プログラムの優先度を定期的にランク付けし、すでに進められているものの調整や再編成を行い、必要に応じて新しいプログラムを策定する。
- 最優先の研究課題(2009年6月時点):①圧力容器内の冷却機能の確保、②溶融した炉心とコンクリートの相互作用、③冷却材の相互作用、④格納容器内での水素の混合と燃焼、⑤ソースタームにおける酸化条件の影響、⑥ヨウ素の化学反応
- 上記の点に関する実験と共同での分析により、問題となる物理現象に関する共通理解の形成
- ASTECの開発と検証や、BWRおよびCANDU炉への応用(従来のASTECはPWRやVVERに適用される評価コード)
- 実験結果の、科学的なデータベース上への保存
- 教育コースの開発と、様々な欧州の組織間における人材交流の促進

EU SARNETプログラム(3)

SARNETによって構築される事故ソースターム評価コード(ASTEC)の構造



SARNETウェブサイトに基づき作成

OECD/NEA: 福島事故を踏まえた安全課題

安全強化のためのNEAの統合的福島活動(INFASE)プログラム(2012.5)

1. 事故の管理及び進行(事故の推移、事故の進展、ヒューマンパフォーマンス、オフサイト)
2. 危機、緊急時のコミュニケーション(公衆、規制者、オンサイトとオフサイト)
3. 深層防護の再評価
4. 多重事象を含む内部／外部事象の発生に関する定義・評価手法、及び設計基準の基準(design-basis criteria)定義手法の見直し
5. 原子力安全の課題となりうる条件の特定／対応のための運転経験等の再評価(運転経験の評価、安全研究のギャップ評価)
6. 規制決定における決定論的手法及び確率論的手法のバランス
7. 規制基盤
8. 放射線防護
9. 除染及び修復による放射線防護の側面

さらにNEAは、過酷事故(SA)コードの開発や福島第一発電所の炉心デブリ除去のための現状の把握を目的として、日本の研究機関(JAEA)等と共同で、「福島第一原子力発電所事故のベンチマーク調査プロジェクト(BSAF)」を2012年11月に開始した。同プロジェクトでは、SAコードを用いた全体の解析、地震発生から6日間の事象解析、12の主要事象の解析が行われている。

国際的な研究プロジェクトとその評価(1)

OECD／NEA：CSNIの役割と合同研究プロジェクト評価

- OECD／NEAでは、原子力施設安全委員会(CSNI)、原子力規制活動委員会(CNRA)を中心に原子力安全分野を所管し、R&D活動を取りまとめている。
- CSNIは1992年、安全性研究に関する専門家上級グループ(SESAR)を設置、SESARは2001年および2007年に現在実施中の研究のレビューおよび将来の必要条件と優先順位の検討を実施した。(レビューの結果、SESARは、適切な研究基盤設備を確保することを支援する国際プログラムを提言した)

2001年レポートで示された中長期的課題

- ・ プラント寿命管理：機器・系統・構築物(ハードウェア)の老朽化、解析と文書化手段(ペーパーウェア)の老朽化、古い施設に対する現代の基準の適用、施設の延命及びバックフィットを含む。
- ・ 運転裕度の最適化：定格出力増強、燃焼度向上、確率論的安全性解析(PSA)の利用拡大等を含む。
- ・ 過酷事故：実用的な事故対策手順の更なる開発及び将来炉における解決策の設計の必要性を含む。

2001年レポート：レビュー時に考慮された技術分野とSESARの勧告

- ・ 熱水力学：確認試験の実施、コード開発の支援及び教育の機会提供の必要性から、原子炉タイプ毎にひとつの主要施設を維持
- ・ 過酷事故：溶融炉心/冷却材相互作用及び核分裂生成物の挙動に関する中核的研究拠点の必要性に対処
- ・ 燃料及び炉物理、構築物の健全性：ホットセルと試験炉の現状を維持
- ・ ヒューマンファクター及びプラント管理・モニタリング：ハルデンプロジェクトを中核研究拠点として維持
- ・ 地震：大型振動台の有用性をモニタする
- ・ 火災安全性：国際データベースを構築し、可能性のある研究の追加を検討する

国際的な研究プロジェクトとその評価(2)

OECD/NEA: CSNIの役割と合同研究プロジェクト評価

●原子力産業固有の課題

- ・ 熱水力学(14)
- ・ 燃料(5)
- ・ 炉物理(6)
- ・ シビアアクシデント(18)
- ・ 機器・構造の健全性(11)

●原子力産業固有でない課題

- ・ ヒューマンファクター(5)
- ・ プラント制御・監視(5)
- ・ 振動の影響(4)
- ・ 火災評価(5)

・ HTGR固有の課題

2007年レポートで示された評価の枠組み

- ・ 2007年の評価では、研究分野を左の10項目に分類
- ・ 各分野で計72の研究課題をピックアップし、安全との関連性、既存知見の状況(知見の未熟度)、研究施設の必要性を評価
- ・ シビアアクシデントについては、事故進展・影響緩和に関する不確実性を減じること、プラントの設計や運転特性の変更(高燃焼度燃料の使用等)による安全影響の理解に役立つ研究課題が有用とされた

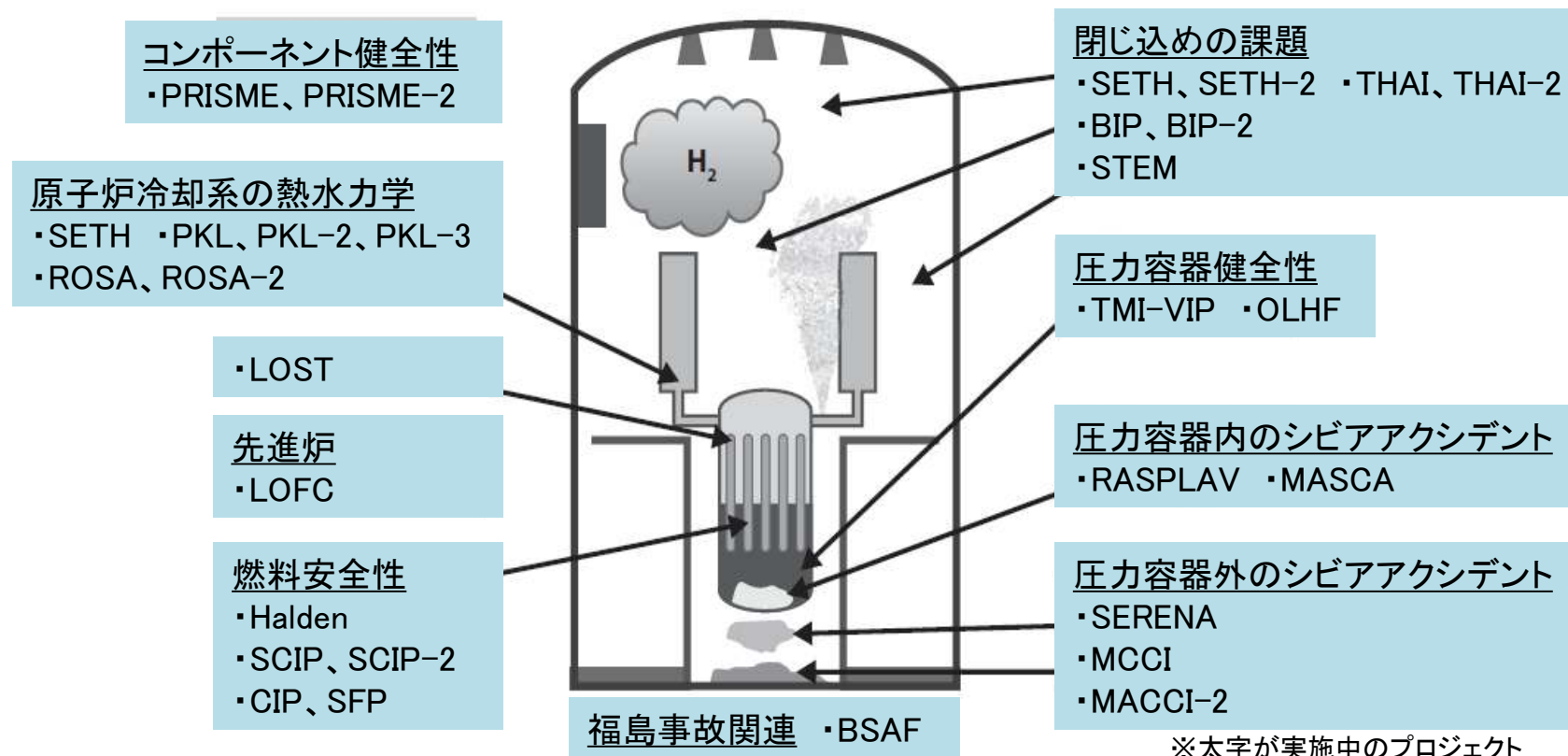
- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1. 溶融前の炉心条件 | 10. 溶融炉心-コンクリート相互作用 |
| 2. 圧力容器内での溶融進行 | 11. 圧力容器外への炉心冷却の相互作用 |
| 3. 圧力容器内での炉心冷却の相互作用 | 12. 可燃性ガスの制御 |
| 4. 炉心溶融の進行による雰囲気の影響 | 13. 核分裂生成物質(FP)の放出 |
| 5. 高燃焼度燃料・MOX燃料の影響 | 14. 閉じ込め失敗後の環境中へのFP放出 |
| 6. 圧力容器(RPV)にかかる圧力 | 15. 格納容器の健全性 |
| 7. RPV健全性の維持 | 16. 格納容器バイパスでの蒸気発生管の過熱・欠損 |
| 8. 圧力管型原子炉の圧力管の健全性 | 17. 過熱された炉心の冷却可能性 |
| 9. 圧力容器外での事故進行と炉心デブリの冷却能力 | 18. 事故管理戦略 |

出典: NEA, Nuclear Safety Research in OECD Countries, Support Facilities for Existing and Advanced Reactors (SFEAR), 2007
NEA, Research and Test Facilities Required in Nuclear Science and Technology, 2010

国際的な研究プロジェクトとその評価(3)

OECD/NEA: 安全高度化のための合同研究プロジェクト

CSNIの2001年、2007年レビュー結果も踏まえ、現在、以下のようなヨウ素挙動プロジェクト(BIP)、ハルデンプロジェクト(Halden)等の、安全・過酷事故管理に係る合同研究プロジェクトが実施されている。



出典: OECD/NEA, Main Benefits from 30 Years of Joint Projects in Nuclear Safety, 2012

付録3

Light Water Sustainability Program Goals and Scope について

ISaG2013* におけるDr. Kathryn A. McCarthy氏**の講演資料より

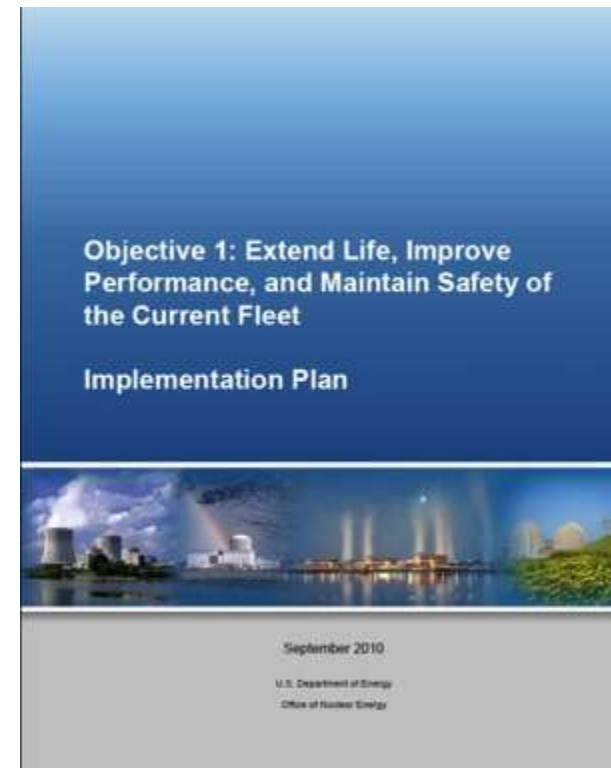
* ISaG2013 : International Symposium on Ageing Management Program Development for System Safety of Nuclear Power Plants (November 22, 2013, Tokyo, Japan)

規制庁事業の総括検討会が主催する国際会議

** Dr. McCarthy氏 : Director, Light Water Reactor Sustainability Technical Integration Office, Idaho National Laboratory (U.S.A)

Light Water Sustainability Program Goals and Scope

- Develop the fundamental scientific basis to understand, predict, and measure changes in materials and structures, systems and components (SSCs) as they age in environments
- Apply this knowledge to develop and demonstrate methods and technologies that support safe and economical long-term operation of existing reactors
- Researching new technologies that enhance plant performance, economics, and safety
- Scope
 - Materials Aging and Degradation
 - Risk-Informed Safety Margin Characterization
 - Advanced Instrumentation, Information and Control Systems Technologies



Light Water Reactor Sustainability Program – the Federal Role

- National strategic interest in the long-term operation of existing plants
 - Supports climate change objectives
 - Supports energy security
 - Avoids higher cost to ratepayers for new plant replacements
- Cost-sharing is being employed through cooperative research activities with industry, primarily the Electric Power Research Institute (EPRI)
- Addresses fundamental scientific questions where private investment or capabilities are insufficient to make progress on broadly applicable technology issues for public benefit
- Government (DOE and its national laboratories) holds a large theoretical, computational, and experimental expertise in nuclear R&D that is not available within the industry
- Benefits will extend to the next generation of reactor technologies being deployed and still in development
- Federal program creates an environment (by reducing uncertainty and risk) that provides incentives for industry to make the investments required for power operation periods to 60 years and beyond

R&D Coordination and Collaboration is Essential to LWRS Program Success

