

リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発  
プロジェクト事後評価報告書  
(案)

平成〇〇年〇月  
産業構造審議会産業技術分科会  
評 価 小 委 員 会

## 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20年10月31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。

経済産業省において実施しているリアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発は、製造・検査等の現場における、電気計測器の校正を実現することを目的として、リアルタイム・キャリブレーション装置（電気複合量自動校正装置）の開発を行うため、平成21年度から平成23年度まで実施したものである。

今回の評価は、このリアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発の事後評価であり、実際の評価に際しては、省外の有識者からなるリアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発プロジェクト事後評価検討会（座長：桐生昭吾 東京都市大学工学部 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分科会評価小委員会（小委員長：平澤 洽 東京大学名誉教授）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。

平成〇〇年〇月

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会

産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会

委 員 名 簿

|     |         |                                                        |
|-----|---------|--------------------------------------------------------|
| 委員長 | 平澤 治    | 東京大学名誉教授                                               |
|     | 池村 淑道   | 長浜バイオ大学<br>バイオサイエンス研究科研究科長・学部学部長<br>コンピュータバイオサイエンス学科教授 |
|     | 大島 まり   | 東京大学大学院情報学環教授<br>東京大学生産技術研究所教授                         |
|     | 太田 健一郎  | 横浜国立大学 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                                            |
|     | 中小路 久美代 | 株式会社S R A先端技術研究所所長                                     |
|     | 森 俊介    | 東京理科大学理工学研究科長<br>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<br>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

リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発プロジェクト事後評価検討会  
委員名簿

|    |       |                                             |
|----|-------|---------------------------------------------|
| 座長 | 桐生 昭吾 | 東京都市大学 工学部 生体医工学科 教授                        |
|    | 柴崎 洋  | 株式会社村田製作所 生産本部 品質保証統括部<br>品質保証部 品質テクニカル課 課長 |
|    | 幅 淳二  | 高エネルギー加速器研究機構 教授                            |
|    | 藤巻 朗  | 名古屋大学大学院 工学研究科 量子工学専攻 教授                    |
|    | 本多 敏  | 慶応義塾大学 理工学部 物理情報工学科 教授                      |

(敬称略、五十音順)

事務局：経済産業省 産業技術環境局 知的基盤課

リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発プロジェクトの評価に係る  
省内関係者

【事後評価時】

産業技術環境局 知的基盤課長 簗内 雅幸（事業担当課長）

産業技術環境局 産業技術政策課 技術評価室長 岡本 繁樹

【プロジェクト立ち上げ時】（事業初年度予算要求時）

産業技術環境局 知的基盤課長 渡邊 重信（事業担当課長）

## リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発プロジェクト事後評価

### 審 議 経 過

○第1回事後評価検討会（平成25年4月30日）

- ・評価の方法等について
- ・プロジェクトの概要について
- ・評価の進め方について

○第2回事後評価検討会（平成25年5月28日）

- ・評価報告書(案)について

○産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会（平成〇〇年〇月〇日）

- ・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分科会評価小委員会 委員名簿

リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発プロジェクト事後評価検討会 委員名簿

リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発プロジェクトの評価に係る省内関係者

リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発プロジェクト事後評価 審議経過

ページ

事後評価報告書概要 ..... i ~ xi

### 第1章 評価の実施方法

|                              |   |
|------------------------------|---|
| 1. 評価目的                      | 2 |
| 2. 評価者                       | 2 |
| 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 | 5 |

### 第2章 プロジェクトの概要

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 1. 事業の目的・政策的位置付け           | 8  |
| 2. 研究開発等の目標                | 13 |
| 3. 成果、目標の達成度               | 22 |
| 4. 事業化、波及効果について            | 65 |
| 5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等 | 68 |

### 第3章 評価

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性           | 76 |
| 2. 研究開発等の目標の妥当性                | 78 |
| 3. 成果、目標の達成度の妥当性               | 80 |
| 4. 事業化、波及効果についての妥当性            | 81 |
| 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 | 83 |
| 6. 総合評価                        | 84 |
| 7. 今後の研究開発の方向等に関する提言           | 86 |

### 第4章 評点法による評点結果 ..... 90

### 参考資料

参考資料1 経済産業省技術評価指針

参考資料2 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

## 事後評価報告書概要

## 事後評価報告書概要

|         |                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| プロジェクト名 | リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発プロジェクト事後評価                                                                                                                       |
| 上位施策名   | 技術戦略マップ2010（計量・計測システム分野）<br>・新規センサー・新原理に基づく計測機器の開発と世界市場への展開<br>・現場ユーザー志向のソフトウェア内蔵・トレーサビリティ要件を保証<br>・不具合検査などものづくり生産現場への計測ソリューション提供<br>・計量標準拡充、標準化活動と認証方法 |
| 事業担当課   | 産業技術環境局 知的基盤課                                                                                                                                           |

プロジェクトの目的・概要

製造・検査等の現場における電気計測器の校正を実現することを目的として、リアルタイム・キャリブレーション装置（電気複合量自動校正装置）の開発を行った。

本研究開発では、産業現場で利用可能なイントリンシック（上位の標準を必要としない）標準を開発し、複数の電気量の自動校正が可能な装置を開発した。

主な研究内容は、

①交流電圧標準交直変換器（サーマルコンバータ）

②任意基準信号発生器

③小型ジョセフソン直流電圧発生装置

④電気標準信号発生システムの開発と評価

の開発である。

当該装置を実現することにより、検査機器、測定器のトレーサビリティの確保が産業現場で可能になる。また、信頼できる任意の複数の電気量を利用できることで、製品開発、性能評価が容易になる。さらに校正に係るコスト、機器管理、校正業務などの負担を低減できることで、校正の普及に貢献する。

|           |  |           |  |           |         |         |  |           |  |
|-----------|--|-----------|--|-----------|---------|---------|--|-----------|--|
| 予算額等（委託）  |  |           |  |           | （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21年度    |  | 平成23年度    |  | —         |         | 平成25年度  |  | 産業技術総合研究所 |  |
| H21FY 予算額 |  | H22FY 予算額 |  | H23FY 予算額 |         | 総予算額    |  | 総執行額      |  |
| 88,999    |  | 85,499    |  | 49,485    |         | 223,983 |  | 222,160   |  |

## 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

本事業においては、小型ジョセフソン素子、サーマルコンバータ、任意信号発生装置、アンプを統合したリアルタイム・キャリブレーション装置を完成させた（図1）。完成した装置は基本的な電気量である直流電圧・電流、交流電圧・電流の同時校正が可能である。電気量においては、直流電圧標準はツェナー標準電圧発生器、交流電圧標準は交直変換器のように別々の標準器で管理する場合も多く、これらと同等の能力を持ち、電気複数量の一括校正が可能となる装置は、今後の JCSS 制度の普及にとって重要である。また、校正結果は製品の性能評価に用いられることも多い。性能評価には、校正された1点のみでなく、複数の点があることが必要とされる。リアルタイム・キャリブレーション装置は、任意の値を校正して発生することが可能な装置であり、電気量では初めてである。



図1 リアルタイム・キャリブレーション装置

開発した装置の特徴のひとつは、利便性を増すようにイントリンシックな標準器の小型化を実現したことである。イントリンシックな標準器を用いていることにより、校正の信頼性が向上し、再校正も5年の長期にわたり不要となることから、産業現場の負担軽減が可能である。さらに、産業現場で利用できるように、代表的な電気計測器に対応する校正システムの自動化を進めた。自動化により、任意の場所で、任意の時間に、産業の現場で使用する電気計測器の校正や点検が容易に実施でき、現場ユーザー志向の校正システムが実現する。

| 個別要素技術                    | 目標・指標                                                                                                                                   | 成果                                                                                                                                                                      | 達成度 |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 課題 1 :<br>薄膜型サーマルコンバータの開発 | 従来のサーマルコンバータは豆電球型の 3 次元構造で、過電流に弱い。産業現場で用いることから、過電流に強い壊れにくい構造が望まれるため、従来の 2 倍の定格電流でも壊れない構造にする。微細加工技術を利用し、薄膜型へと小型化する。形状は 3 cm×3 cm 以内を目指す。 | 薄膜型サーマルコンバータ素子の形状は 1.5 cm×1 cm を達成した。また、ヒータ抵抗 700 Ω の定格電流は 20 mA で通常のサーマルコンバータの 2 倍の電流を印加可能である。                                                                         | 達成  |
|                           | サーマルコンバータの交直差の特性を改善する。標準として利用できるよう、ヒータ抵抗の温度係数は 10 ppm/°C 以下に抑え、熱的時定数を最適化することで、低周波特性を 10 ppm 以内に改善する。                                    | ヒータ抵抗の温度係数はヒータ膜作製のアニールの条件を詳しく調べ、10 ppm/°C 以内を実現した。この結果、交直差の低周波特性は 10 ppm 以内に改善した。                                                                                       | 達成  |
|                           | サーマルコンバータを薄膜化することにより、作製の歩留まりが悪く、製品化の支障になる可能性がある。歩留まりを 9 割以上に向上する作製方法を開発する。                                                              | 本プロジェクトで開発したサーマルコンバータは、熱電対薄膜とヒータ薄膜を別々の基板で独立に作製している。ヒータ基板を熱電対基板に取り付ける作業が歩留まりの原因である。このため、薄膜作製用のホルダーを作製し、熱電対膜作製の改善を行い、歩留まりを 9 割以上に改善することに成功した。                             | 達成  |
|                           | サーマルコンバータの劣化防止を行う。サーマルコンバータのヒータの発熱による材質の劣化が予想される。10 年間にわたり使用可能で、経年変化が 3 ppm 以下のサーマルコンバータの素子の開発を行う。                                      | サーマルコンバータの劣化の原因を調査する実験の結果、熱電対膜の劣化が顕著であることを特定した。高温対策の膜の構造に成功し、熱電対の高温環境での劣化防止対策を実現した。温度加速による寿命予測モデルを適用して、通常の使用において、10 年以上使用可能な素子を開発した。また、交直差の経年変化も定期的な校正から、1 ppm/年の経年変化の結 | 達成  |

|                           |                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |    |  |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|--|
|                           |                                                                                            | 果を得ている。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |  |
| 課題 2 :<br>複合量任意信号源回路の開発   | サーマルコンバータを利用した高精度任意信号発生装置の開発を行う。任意発生器でサーマルコンバータの交直差を参照として、出力は 1 V~10 V の交流電圧を発生できる装置を開発する。 | 任意信号発生装置においては、直流信号と交流信号の切り替え器であるマルチプレクサ、電流量を確保するバッファアンプ、信号の振幅を比較、補正するエラー解析装置、シンセサイザを開発した。交流電圧は、サーマルコンバータを参照して、ジョセフソン電圧とシンセサイザの実効値を比較し、交流信号の振幅を校正して、1 V~10 V の基準信号を出力することに成功した。                                                                                                                                                | 達成 |  |
|                           | 5 kHz 以下での交流電圧の不確かさが 30 ppm 以内の任意信号発生装置を開発する。                                              | スイッチング制御、及び、サーマルコンバータの出力信号のサンプリング制御するシステムの開発を行った。これにより、精度の向上をはかった。交流電圧の不確かさ評価を行い、1 kHz で不確かさ 8 ppm を実現した。                                                                                                                                                                                                                     | 達成 |  |
| 課題 3 :<br>小型ジョセフソン電圧標準の開発 | 12 K 程度の温度で動作可能なジョセフソン素子を設計、作製する。                                                          | ジョセフソン素子の設計と動作確認を行い、以下の結果を得た。<br>(1) ストレスの小さい多結晶 NbTiN 薄膜において、超伝導転移温度 $T_c=14.7$ K、抵抗率 $103.5 \mu \Omega \text{ cm}$ の値を得る条件を見出した。<br>(2) この薄膜と Ti-TiN 常伝導層を用いてジョセフソン接合を提案し、32768 個のジョセフソン接合を含む電圧標準用アレーにおいて 1 V のシャピロステップを 0.5 mA の電流幅で得ることに成功した。<br>(3) NbTiN 薄膜は、電圧標準用の材料としても小さい抵抗率、高い $T_c$ をもち、直流電圧標準として使用可能なことを示すことができた。 | 達成 |  |

|                                 |                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |           |  |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--|
| <p>課題3：<br/>小型ジョセフソン電圧標準の開発</p> | <p>ジョセフソン装置のシステム制御回路の小型化を行う。要素回路（温度制御回路、バイアス回路、マイクロ波回路、電圧増倍回路）を開発する。コンプレッサー以外の全ての要素部品を、19 インチの計測ラックに搭載可能な、標準規格の筐体（幅 450 mm 高さ 270 mm 奥行き 500 mm 程度）に収納することを目標とする。</p> | <p>温度制御回路については、6 つのメイン回路部（(1) ロジック回路用電源回路、(2) アナログ回路用電源回路、(3) 電源周波数検出回路、(4) 温度測定用 ADC 回路、(5) 温度測定・ヒーターレベル設定用 DAC 回路、(6) ヒーター電流出力回路）を独自に開発した。バイアス回路は、従来の直流電圧標準用システムのバイアス回路を見直し、出力チャネル数などを削減することによって、小型化を実現した。マイクロ波回路については、従来のシステムのパッケージングを工夫することにより、コンパクト化を行なった。電圧増倍回路は今回新たに開発し、10 個の独立した DAC を用いて作製した。以上の取り組みにより、容積比で約 30% のコンパクト化を達成し、19 インチの計測ラックに搭載可能なシステム制御回路を開発した。</p> | <p>達成</p> |  |
|                                 | <p>液体 He フリーの小型冷凍機を用いたクライオスタットを開発する。10 mK 以下の温度安定性と 10 K まで冷却が可能なクライオスタットを製作する。</p>                                                                                   | <p>極低温冷凍機で発生する周期的温度振動（ステージ部分では 10 mK 以上の温度変動を発生）を抑えるため、10 K においても比較的大きな比熱を有している鉛のブロックをコールドヘッドに付加して、温度変動を軽減した。動作試験において、10 mK 以下の温度安定性を確認した。</p>                                                                                                                                                                                                                              | <p>達成</p> |  |
|                                 | <p>開発したジョセフソン素子、システム制御回路、クライオスタットを用いて、ジョセフソン電圧発生装置を完成させる。正常動作の確認を行う自動制御プログラムを開発することにより、直流電圧 1 V において、不</p>                                                            | <p>任意の直流電圧を自動制御で発生させるため、RF モジュール、TEMP モジュール、BIAS モジュール、RF モジュール、VMx10 モジュールを USB インターフェイスで制御可能なシステムを開発した。トラップ除去や動作温度、及び、RF</p>                                                                                                                                                                                                                                              | <p>達成</p> |  |

|                                    |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                    |    |  |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|--|
| 課題3：<br>小型ジョセフ<br>ソン電圧標準<br>の開発    | 確かさ 0.5 ppm 以下での校正能力を持つことを目標とする。                                                                                                                      | パワーの最適化、バイアス電流の動作点の最適化も自動制御可能とした。DAC 出力電圧をジョセフソン電圧と再度比較、補正することにより、校正された出力電圧の発生が可能である。これらにより、0.5 ppm 以下で、直流電圧の校正が可能なシステムを開発した。                                                                                      |    |  |
| 課題4：電気<br>標準信号発生<br>システムの開<br>発と評価 | 課題2の任意信号発生装置の出力(最大 10 V)を増幅し、100 V までの出力が可能なアンプを開発する。アンプの特性評価を行い、100 V、50 Hz で長期安定度 100 ppm 以下の電圧増幅器を開発する。                                            | 交流電圧発生器の技術を用いて、長期に安定な増幅率 10 倍の電圧増幅器の設計・開発及び製作と評価を行った。短期安定度、温度依存、長期安定度の評価をから、短期安定は±10 ppm、温度特性は 3 ppm/°C、長期安定度は 65 ppm を実現した。                                                                                       | 達成 |  |
|                                    | 課題2の任意信号発生装置を用いて、5 A まで電流が発生可能なトランスコンダクタンスアンプを開発する。5 A、50 Hz で長期安定度 100ppm 以下の電圧－電流変換器を開発する。                                                          | 交流電流発生器の技術を用いて、長期に安定な電圧－電流変換の設計・開発及び製作と評価を行った。短期安定度、温度依存、長期安定度の評価を行なった。短期安定は±20 ppm、温度特性は 7 ppm/°C、長期安定度は 55 ppm を実現した。                                                                                            | 達成 |  |
|                                    | 課題1～3のシステムを統合し、産業現場で、直流電圧と交流電圧が校正可能な装置を開発する。電流と電圧は同時に発生可能として、複数電気量の校正が可能なシステムとする。周波数 0～3 kHz、電圧 0 V ～ 100 V、電流 0 A ～ 5 A においてそれぞれ校正された任意の出力値が発生可能とする。 | 開発した任意信号発生回路、自動補正システム、薄膜型サーマルコンバータ、小型ジョセフソン電圧標準制御システムを統合化した。統合制御プログラムを開発し、複合量電気標準信号発生システムの安定度評価を行い、高精度な電圧・電流（50 Hz で 100 ppm 以下の安定度）の同時出力を実現した。出力範囲は、計画通りに、電圧範囲は 100 V 以下、0 ～ 3 kHz、電流範囲は、5 A 以下、0～3 kHz の出力が可能である | 達成 |  |

## (2) 目標及び計画の変更の有無

当初平成21年度から平成25年度まで行う結果であったところ、以下の見直しを行い、事業の効率化を図った結果、研究開発期間を2年短縮した。

### <共通指標>

| 論文数 | 特許等件数<br>(出願を含む) | ライセンス<br>供与数 |
|-----|------------------|--------------|
| 17  | 2                |              |

### 評価概要

#### 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

産業現場で利用可能なイントリンシック標準の開発及び複数電気量のワンストップキャリブレーションが可能な校正装置の開発は、製造・検査現場での生産性向上等に寄与するものとして産業界からのニーズが高い。また世界的に見ても科学的・技術的意義は高く、科学技術基本計画、技術戦略マップでの位置づけに沿った研究開発事業として、先進性ならびに実用性がある。さらに、従来の計測器のトレーサビリティ確保の概念を超える革新性もあることから、事業の目的は妥当といえる。しかし、社会ニーズにより応えていくためには、小型化、校正範囲の拡張等についての検討が望まれる。

#### 2. 研究開発等の目標の妥当性

目標設定は、校正不確かさや長い校正周期を可能とする長期安定性など、明確かつ無理のない設定となっており、全般的には妥当なものと評価できる。設定された目標が達成できれば、国家標準へのトレーサビリティの確保における、校正に要する時間の制約という問題が解決される。しかし、システムのサイズや AC 電圧出力など、具体的な根拠に乏しい目標設定が見られたほか、現場における雑音等の環境の影響を考慮した開発や、重要な電気量の一部についての開発、抵抗の長期安定性に関する目標等が設定されていなかった。また、開発進捗状況等から考えて、10 V 出力ジョセフソン素子の開発に注力するという目標設定も検討すべきであった。

#### 3. 成果、目標の達成度の妥当性

個別に設定された目標値はクリアされており、製作された「リアルタイム・キャリブレーション装置」も明示されている。また要素技術であるジョセフソン電圧標準発生装置の小型化や薄膜型サーマルコンバータは、技術的に大きな成果である。しかし、実際の産業界での運用を考えると、サーマルコンバータのヒートサイクル劣化試験の実施や、装置の更なる小型化、上位標準に基づく校正方法、長期間の不確かさの保証など、さらなる検討が必要である。

得られた成果の学術的価値は高く、論文発表など外部発表も十分であるが、その反面、国内での研究発表件数、特許申請数については十分とは言えない。

#### 4. 事業化、波及効果についての妥当性

開発成果物の総合体である「リアルタイム・キャリブレーション装置」については、校正項目によっては校正周期を5年以上とする目処が立っており、事業化の見通しは立っている。今後、新興国での活用も期待されることから、早期の事業化展開が望まれる。それぞれ開発成果物である「サーマルコンバータ」や「小型ジョセフソン装置」については比較的短期間で製品化等活用が見込めており、様々な波及効果があるものと期待される。

一方、デジタルマルチメータやキャリブレータの全測定範囲をカバーするにはまだ出力範囲が不十分であり、活用範囲拡大のためには装置のより一層の小型化が望まれる。

なお国内においては、5年以上に校正周期を延ばす場合、法的な整備が必要であるが、開発された技術を国際標準化するためには、同時にグローバルな視点での制度設計が必要である。

#### 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

短い開発期間と限られた予算の中で、効率的な開発により十分な技術的成果が達成されており、産総研主導による実施体制、中途での適切な見直しを含む計画立案、スケジュール、費用対効果はおおむね妥当であったと考えられる。

一方、小型ジョセフソン素子開発に関しては、産総研内の関連研究グループとの研究協力、サーマルコンバータ開発との資金配分など、検討が十分ではないと思われる点が見いだされた。今後、スマートメータの普及などが見込まれることから、電力校正についても検討すべきと思われる。

#### 6. 総合評価

実施事業者の技術力、現場でのニーズをもとに妥当な開発計画が立てられており、短い期間と限られた予算の中で、イントリンシック標準による複数電気量のワンストップ校正システムを実現するための開発目標を達成したことを高く評価する。今後同システムの事業化を遅滞なく推進すべきである。また今後大きな市場を見込むには、更なる小型化あるいはモジュール化と、デジタルマルチメータや多機能キャリブレータといった機器のほぼ全測定範囲をカバーすることが重要である。校正周期を5年以上に延ばすには、長期間安定なシャントの開発とあわせて、JCSS 制度の運用法の検討が望まれる。薄膜型サーマルコンバータ、小型ジョセフソン電圧標準についても波及効果を持つ要素技術として事業化が期待できる。

しかし、国内における成果発信は十分とは言えない。比較的大型の資金が投入されていることを念頭に、学術分野への貢献や広報などの社会貢献にも意識を注ぐ必要がある。

#### 7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

現場におけるエンドユーザーの実戦的な試用による装置の耐久性評価は、今後の最重要ポイントとなる。また今後ソフトウェアやユーザインターフェースなどシステムの完成度を高めることが重要であり、開発パートナーの選択は極めて重要である。

また、大きな市場を獲得するためには、デジタルマルチメータや多機能キャリブレータの測定範囲をカバーできる出力機能が求められ、そのために高安定な抵抗器が必要である。今後、スマートメータの普及が見込まれ、これの校正、検定に関する研究開発、法整備が急務である。

また、一次標準の研究開発は、継続的に国家的にサポートする必要があることから、長期的な視点に立った研究計画が必要である。

無線電力伝送技術に関連して、中周波（数十 kHz～数十 MHz）の高精度電力計測機器の開発を支える計量標準の開発が今後重要である。また、高位の標準を必要としないイントリンシック標準を目指すのであれば 10 V PJVS によるシステムの開発が必要である。

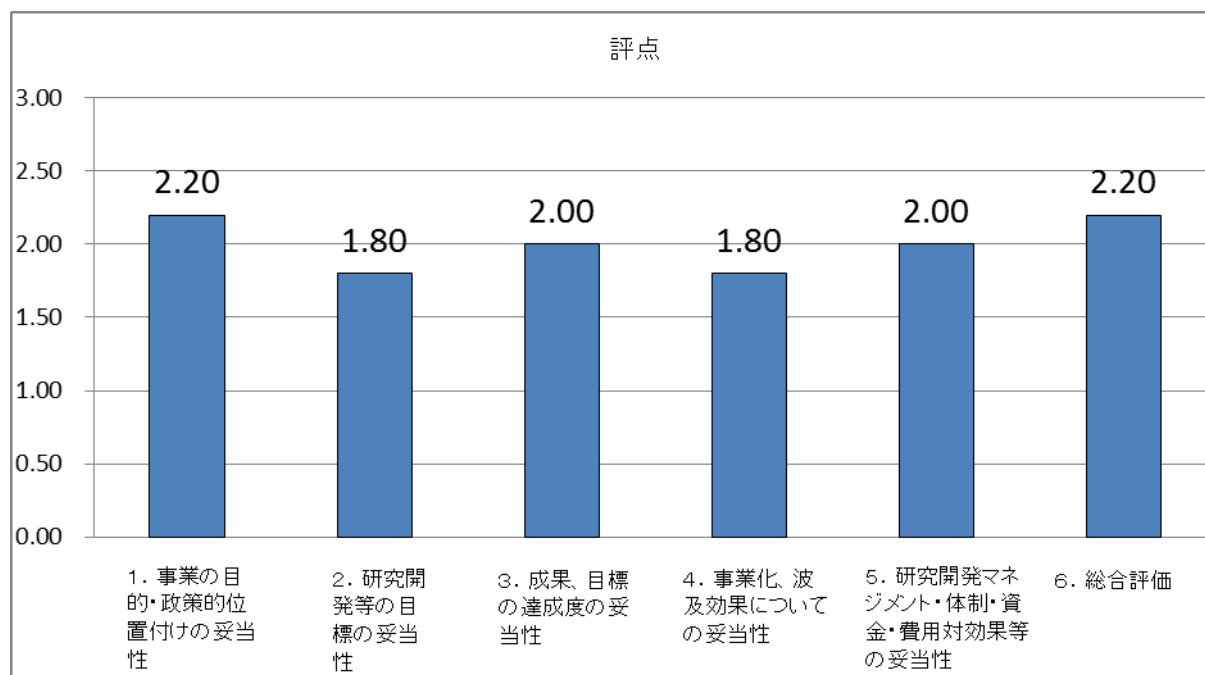
本事業で開発した装置の早期の事業化が望まれることから、事業化に対する障害を整理し直し、より早期に事業化できる道筋を立てることを強く期待する。

## 評点結果

### 評点法による評点結果

(リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発プロジェクト)

|                                | 評点   | A<br>委員 | B<br>委員 | C<br>委員 | D<br>委員 | E<br>委員 |
|--------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性           | 2.20 | 2       | 2       | 3       | 2       | 2       |
| 2. 研究開発等の目標の妥当性                | 1.80 | 2       | 1       | 3       | 1       | 2       |
| 3. 成果、目標の達成度の妥当性               | 2.00 | 2       | 2       | 3       | 2       | 1       |
| 4. 事業化、波及効果についての妥当性            | 1.80 | 2       | 1       | 2       | 2       | 2       |
| 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 | 2.00 | 2       | 1       | 2       | 3       | 2       |
| 6. 総合評価                        | 2.20 | 2       | 2       | 3       | 2       | 2       |



## 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。）に基づき、以下のとおり行われた。

## 1. 評価目的

評価指針においては、評価の基本的考え方として、評価実施する目的として

- (1) より良い政策・施策への反映
- (2) より効率的・効果的な研究開発の実施
- (3) 国民への技術に関する施策・事業等の開示
- (4) 資源の重点的・効率的配分への反映

を定めるとともに、評価の実施にあたっては、

- (1) 透明性の確保
- (2) 中立性の確保
- (3) 継続性の確保
- (4) 実効性の確保

を基本理念としている。

プロジェクト評価とは、評価指針における評価類型の一つとして位置付けられ、プロジェクトそのものについて、同評価指針に基づき、事業の目的・政策的位置付けの妥当性、研究開発等の目標の妥当性、成果、目標の達成度の妥当性、事業化、波及効果についての妥当性、研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等の妥当性の評価項目について、評価を実施するものである。

その評価結果は、本プロジェクトの実施、運営等の改善や技術開発の効果、効率性の改善、更には予算等の資源配分に反映させることになるものである。

## 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、プロジェクト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 5

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知的基盤課が担当した。

### 3. 評価対象

リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発プロジェクト（実施期間：平成21年度から平成23年度）を評価対象として、研究開発実施者（独立行政法人産業技術総合研究所）から提出されたプロジェクトの内容・成果等に関する資料及び説明に基づき評価した。

### 4. 評価方法

第1回評価検討会においては、研究開発実施者からの資料提供、説明及び質疑応答、並びに委員による意見交換が行われた。

第2回評価検討会においては、それらを踏まえて「プロジェクト評価における標準的評価項目・評価基準」、今後の研究開発の方向等に関する提言等及び要素技術について評価を実施し、併せて4段階評点法による評価を行い、評価報告書(案)を審議、確定した。

また、評価の透明性の確保の観点から、知的財産保護、個人情報で支障が生じると認められる場合等を除き、評価検討会を公開として実施した。

### 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

評価検討会においては、経済産業省産業技術環境局技術評価室において平成21年6月1日に策定した「経済産業省技術評価指針に基づく標準的評価項目・評価基準について」のプロジェクト評価（中間・事後評価）に沿った評価項目・評価基準とした。

#### 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。

## 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。

(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。

- ・社会経済情勢等周辺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



## 第2章 プロジェクトの概要

## 第2章 プロジェクトの概要

### 1. 事業の目的・政策的位置付け

#### 1-1 事業目的

生産現場、研究開発で広く利用されている電圧計、電力計、電気指示器、電子センサーなどの計測機器は、品質管理、性能評価、製品開発、環境モニターのため、高精度化や高信頼性が強く求められている。一方、製品のグローバル化、標準化も急速に進んでおり、日本で製造された製品を輸出する際、国内の基準のみでなく、国際規格を満たす必要性に迫られている。現在、国内外で、製品の製造者責任も厳しく問われており、検査の測定結果について保証が求められている。特に、電気関連製品については、出荷時に耐電圧試験などの製品検査が求められ、検査に用いた計測器の信頼性が重要になっている。例えば、アメリカで使用される電気製品については、安全性を審査する機関：Underwriters Laboratories Inc.（UL）が発行する UL 規格において、検査する計測器に国家標準へのトレーサビリティを求められるようになってきており、検査結果の不備があると、実質輸出できなくなる可能性もある。

上記の背景のもと、製品の生産現場での過大な負担として、以下の2つの課題が挙げられる。

- ・定期的な校正：これらの生産現場で検査などに用いられる汎用計測器、特に電気計測器は、温度・湿度・振動等の環境外乱の影響を受け易く、測定値も時間や温度と共に変化することから、汎用計測器の校正值の劣化は不可避である。そのため、定期的に（通常、年に1度）校正を行い、検査・測定結果を保証する必要がある。

- ・複合量の一括校正：生産現場の電気計測においては、例えば直流電圧だけでなく、高調波を含む交流電圧や交流電流、あるいは電力といった複数の測定量をひとつの計測器で計測することが一般的であり、計測器を校正する際にはこれらの測定量すべてについて校正することが必要となる。

このような課題を解決するため、本事業では、生産現場の汎用計測器を、生産現場で、任意の時間に、任意の場所で、簡単に校正し、国家標準へのトレーサビリティを容易に確保できる校正技術の開発を行った。

本事業の成果物であるリアルタイム・キャリブレーション装置は、電気標準の中でもイントリンシック（上位の標準を必要としない）標準である小型ジョセフソン電圧標準装置

と薄膜型サーマルコンバータ交直変換標準を利用しており、常に校正された値を利用できるため、汎用電気計測器の直流、交流電流量などの電気複合量を一括して校正可能になる。

この装置が産業現場に普及することにより、製造現場において測定器のトレーサビリティの確保を通して、信頼できる任意の複数の電気測定量が容易に利用できるようになり、性能評価の高度化と製品開発の加速が期待できる。また、校正業務の大幅な省力化により経費削減につながり、我が国のものづくり産業の国際競争力強化に貢献することが期待できる。

## **1－2 政策的位置付け**

科学基盤としての計測技術の開発や標準の普及を推進し、社会生活の安心安全、産業の競争力強化するため、経済産業省により、「技術戦略マップ 2010（計量・計測システム分野）」が策定されている。これは、計量標準の整備、計測技術の研究開発、試験評価方法やデータベースを構築することにより、日本社会のインフラ、ものづくり基盤、通商の円滑化を効果的に進めるものである。

図 1－1 の技術戦略マップ 2010（計量・計測システム分野）の導入シナリオでは次の項目が重点化として取り上げられており、本事業の目的・内容と合致している。

- ・新規センサー・新原理に基づく計測機器の開発と世界市場への展開
- ・現場ユーザー志向のソフトウェア内蔵・トレーサビリティ要件を保証
- ・不具合検査などものづくり生産現場への計測ソリューション提供
- ・計量標準拡充、標準化活動と認証方法

また、図 1－2 に示したように、技術戦略マップ 2010（計量・計測システム分野）技術マップの「電気計測（直流・低周波）」の分野において、本事業の研究開発に対応する装置、技術課題が位置付けられている。

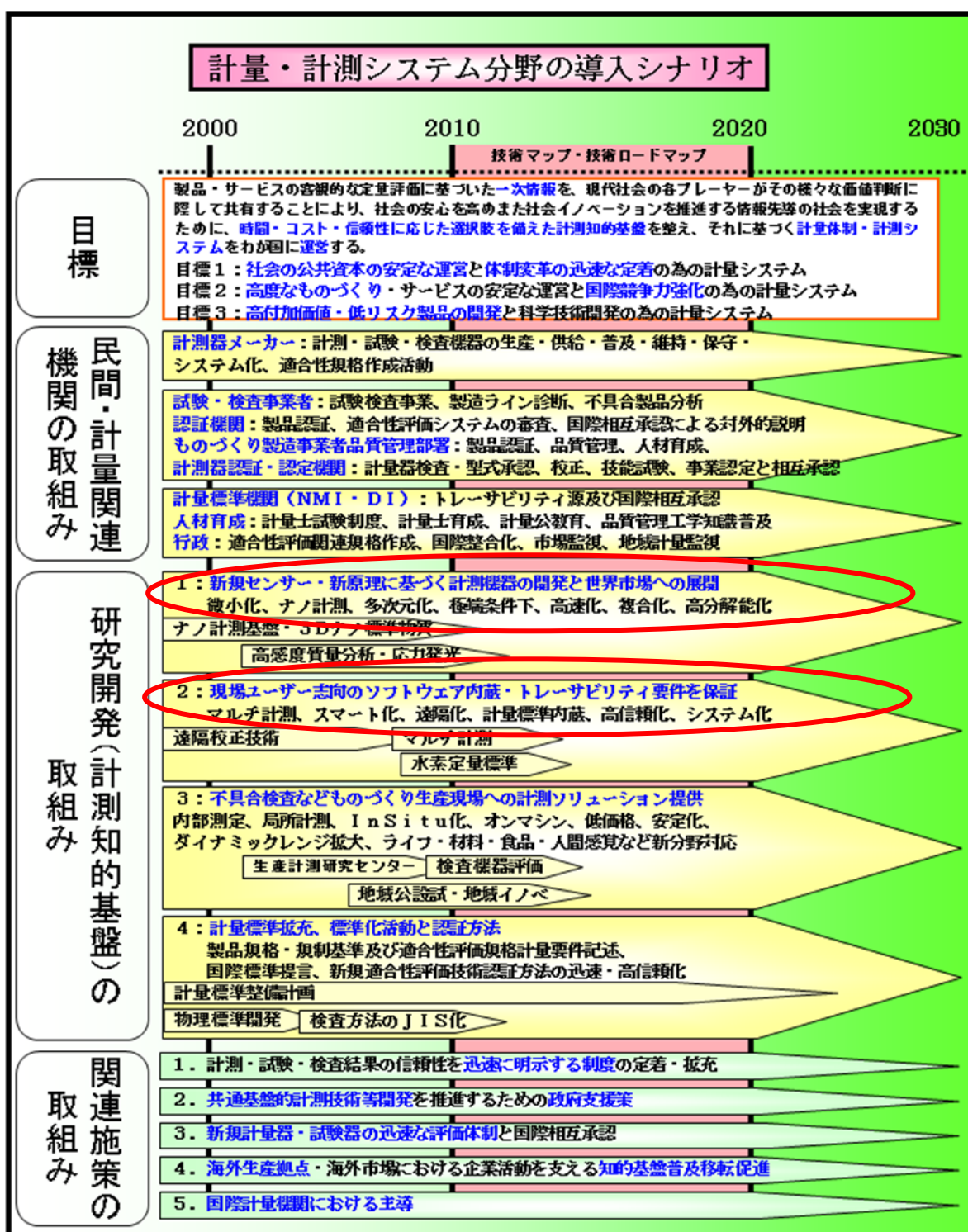


図 1-1 技術戦略マップ 2010（計量・計測システム分野）の導入シナリオ  
出所：経済産業省『技術戦略マップ 2010』

| 大分類          | 中分類 | 小分類  | 装置名          | 課題       | 技術課題(□重要課題 ■重要課題)                                     |
|--------------|-----|------|--------------|----------|-------------------------------------------------------|
| 電気計測(直流・低周波) | 直流  | 直流電圧 | 直流電圧発生装置     | 高精度化     | 次世代電圧標準(直流電圧標準の汎用化)                                   |
|              |     |      |              | トレーサビリティ | ジョセフソン接合型電圧標準を用いた電圧標準の供給維持 1 V, 1.018 V, 10 V         |
|              |     |      |              | トレーサビリティ | 電子式標準電圧発生器を仲介器にした電圧標準の維持 1 V, 1.018 V, 10 V           |
|              |     |      | 直流電圧測定装置     | 高精度化     | プログラマブル駆動型ジョセフソン素子電圧標準の電圧増大(直流電圧標準、交流電圧標準に利用)         |
|              |     |      |              | 高精度化     | 新太陽電池基準セルの校正技術の開発                                     |
|              |     |      | 標準直流分圧器      | ダイミツクレンジ | 1000Vに対応した分圧器標準の開発(標準の再立ち上げ、Fluke 752Aなどの校正に使用)       |
|              |     |      |              | 高精度化     | 量子直流分圧器標準の開発(Fluke 752Aなどの校正に応用)                      |
|              |     |      |              | 複合化      | 量子ハイブリッド電圧標準の開発(Fluke 752Aなどの校正に応用)                   |
|              |     | 直流電流 | 直流電流発生装置     | 高精度化     | 単一電子トランジスタを用いた量子電流送信器および量子電流標準の開発(放射線、光標準、微粒子濃度標準に応用) |
|              |     |      |              | 複合化      | ジョセフソン電圧標準で安定化した電流源(直流電流測定装置としての応用)                   |
|              |     |      | 直流電流測定装置     | 高精度化     | 微小電流測定(放射線、光標準、微粒子濃度標準に利用)                            |
|              | 交流  | 交流電圧 | 交流電圧交直電圧比較装置 | 微小化      | 交流電圧サーマルコンバータ(機器組込用デバイス微小化高電圧対応、交直変換器標準の応用)           |
|              |     |      | 交流電圧増幅器      | 高精度化     | 高精度広帯域ゲルゲニアンプの開発                                      |

図 1-2 技術戦略マップ2010(計量・計測システム分野)の技術マップ

出所：経済産業省『技術戦略マップ2010』

### 1-3 国の関与の必要性

第3期、第4期科学技術基本計画において、知的基盤の重点的整備の必要性が記載されており、国民生活、社会経済活動を支える基盤として、計量標準の整備、研究開発がもりこまれている。

一方、日本では1993年に計量法にトレーサビリティ制度が導入され、国家計量標準の指定と校正事業者の認定が開始され、図1-3のようなトレーサビリティ体系が構築されている。また、1999年に各国の国家計量標準機関との間で、「国家計量標準機関が発行する校正証明書の相互承認協定」が結ばれている。

本事業の意義の一つとして、社会経済活動を支える基盤としての標準の開発があり、一例として、国際貿易の障壁を取り除くことにある。2000年代の経済のグローバル化と通商の拡大にともない、企業や市民が製品の品質や安全性に強い関心を持つようになり、EUや米国では、材料、部品、製品に関する試験データの提示を求めるようになっている。輸入規制の対象品目に関しては、試験データの提示にとどまらず、試験データの信頼性に関する根拠も同時に要求され、試験に用いた計測器が国家計量標準にトレーサブルであることが必要である。EUは、電気電子機器に対して、電磁適合性(EMC)の試験データの提示と、それに用いた計測器の適切なトレーサビリティを要求している。米国連邦航空局(FAA)は、米国籍の航空機を整備する場合、整備試験データの提示と、検査に用いた計測器の適切なトレーサビリティを要求している。

しかし、国内各企業がさまざまな計量標準を独自に確立することは非効率であり、また中小企業にとっては製品の輸出の重い負担となり、産業の拡大の障害となることから、公共財的性格を持つ標準整備、ならびに国内トレーサビリティの普及を促進するための技術

開発は国が責任を持って実施することが必要である。

また、図 1－3 に示すように、各国計量標準機関はメートル条約、国際法定計量機関、国際試験所認定機関、JIS、IEC における計測・認証関連規格などの活動を元に計量標準の相互承認を推進し、国際整合性の確保に努めている。これらの活動を通して、製品の品質保証、安全性の確保に貢献する。

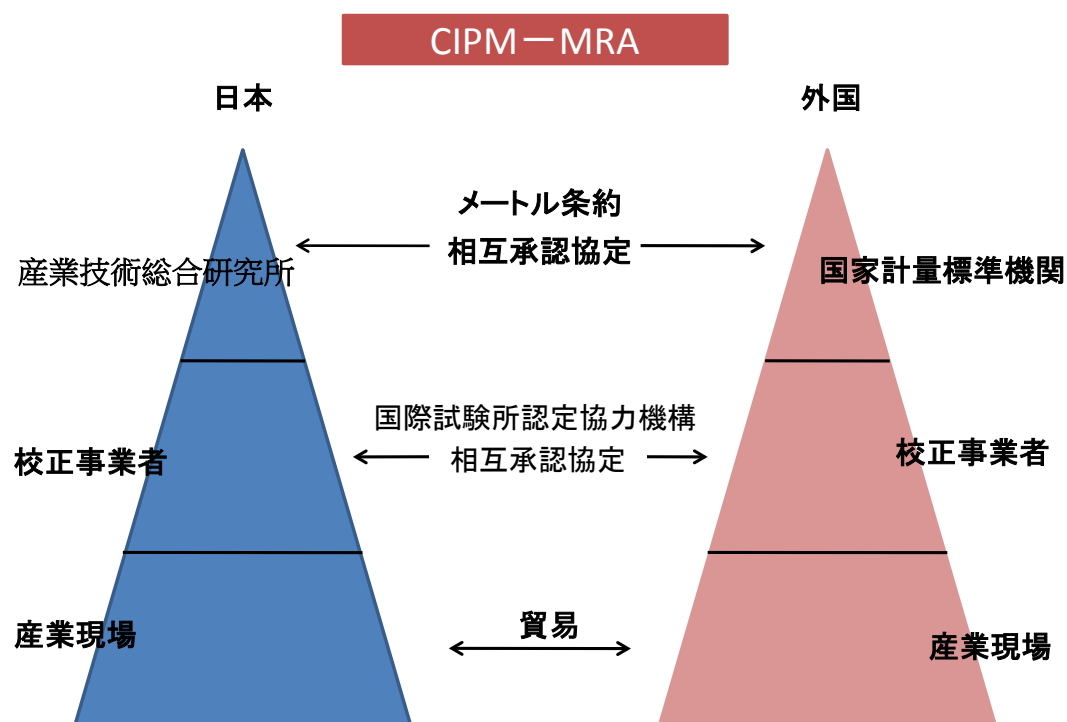


図 1－3 計測のトレーサビリティ体系と国際相互承認

## 2. 研究開発目標

### 2-1 研究開発目標

電気標準の中でも特に環境に依存しないプログラマブルジョセフソン電圧標準(PJVS)と薄膜型サーマルコンバータ交直変換標準を利用して、長期間校正不要な電気標準校正システムを開発する(図2-1)。図2-2に示されるように、ものづくり産業の生産現場において、汎用電気計測器の評価をリアルタイムに実施するとともに、直流電圧・電流、交流電圧・電流などの複合量を一括して校正可能な技術の確立と装置開発を目標とする。

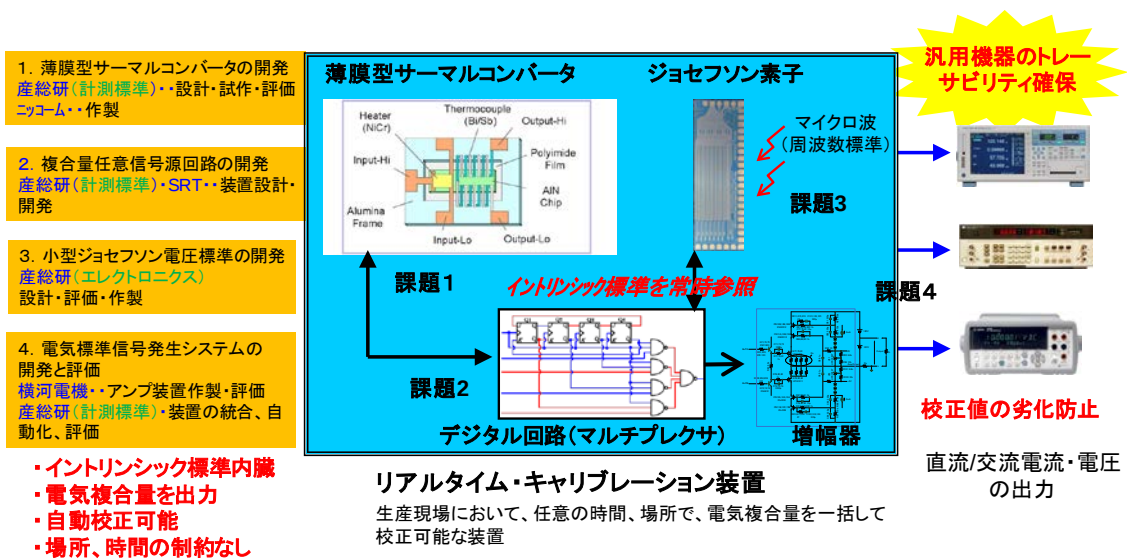


図2-1 リアルタイム・キャリブレーション技術の概念図

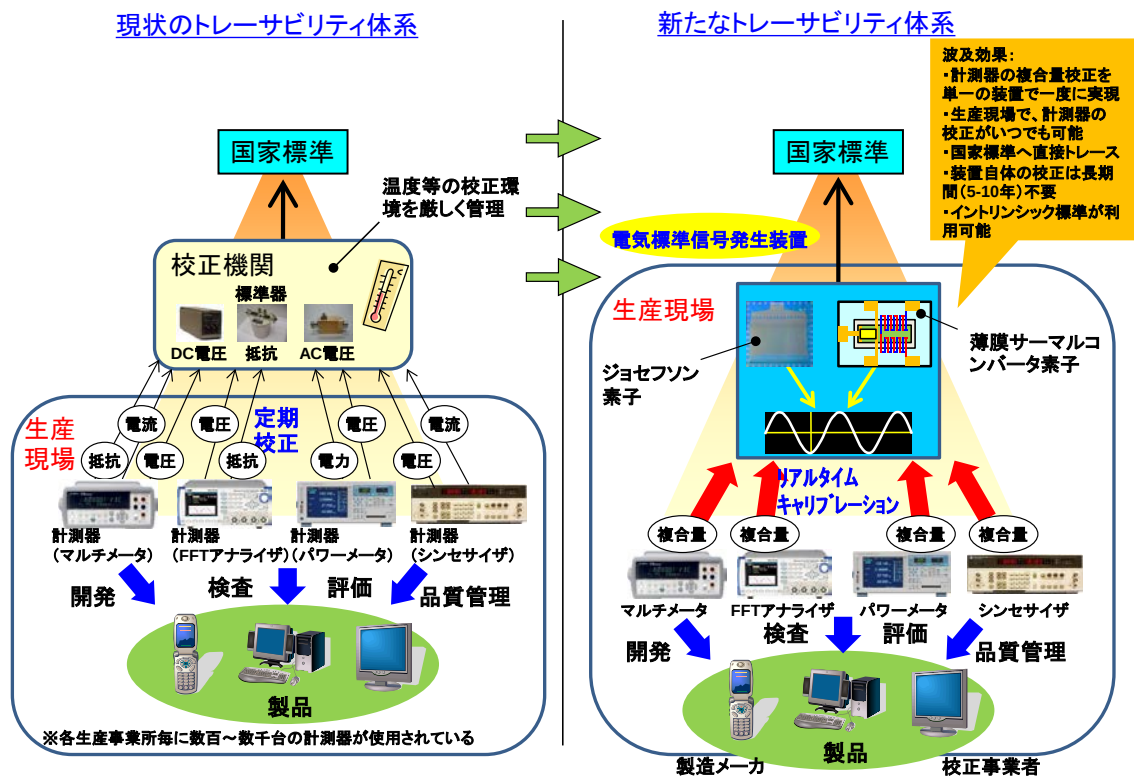


図2-2 トレーサビリティ体系図

## 2-1-1 全体の目標設定

リアルタイム・キャリブレーション技術の開発が掲げる全体の目標・指標は表2-1の通りである。

表2-1. 全体の目標

| 目標・指標                                                                                                    | 設定理由・根拠等                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| イントリンシック（上位の標準を必要としない）標準であるジョセフソン電圧標準と薄膜型サーマルコンバータ交直変換標準を利用して、任意の値の電気量が校正可能なシステムを開発する。                   | 持ち運び可能な小型の「イントリンシック標準」を開発することで、頻繁な校正が不要となり、産業現場での校正が実現できる。また、ジョセフソン電圧標準と薄膜型サーマルコンバータ交直変換標準を開発することで、任意な電気量の校正も可能となる。                                                                                                               |
| ものづくりの現場において、任意の時間、任意の場所で、汎用電気計測器の評価、校正をリアルタイムに実施するとともに、直流電圧・電流、交流電圧・電流などの複合量を一括して校正可能な技術の確立と装置開発を目標とする。 | 事業者にとって、計測器の校正はコスト増につながる。産業現場で、事業者の希望する時期に校正が可能となれば、製品開発のロスをなくし、生産性を向上させることができる。自動化した校正システムを構築することで、校正の作業の負担も軽減できる。<br><br>また、現在の校正は、電流だけ、電圧だけといった個別の量ごとの校正になっている。複数電気量を校正可能なシステムが構築できれば、産業現場において、複数量測定できるマルチメータなどの装置の一括校正が可能となる。 |

## 2-1-2 個別要素技術の目標設定

リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発は以下の4つの要素技術課題に分けて実施した。

- ・課題1：薄膜型サーマルコンバータの開発
- ・課題2：複合量任意信号源回路の開発
- ・課題3：小型ジョセフソン電圧標準の開発
- ・課題4：電気標準信号発生システムの開発と評価

表2-2に各個別要素技術の目標をまとめる。

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                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 課題1：薄膜型サーマルコンバータの開発 | 従来のサーマルコンバータは豆電球型の3次元構造で、過電流に弱い。産業現場で用いることから、過電流に強い壊れにくい構造が望まれるため、従来の2倍の定格電流でも壊れない構造にする。微細加工技術を利用し、薄膜型へと小型化する。形状は3 cm×3 cm以内を目指す。 | 従来のサーマルコンバータは豆電球型の構造で、機械的に弱く、過電流に対して壊れやすい。産業現場で用いるには壊れにくい構造が必要である。サーマルコンバータには10 Vまでの電圧を印加することから、ヒータ抵抗500 Ωの場合、20 mAの電流が流れる。従来のサーマルコンバータ定格電流は10 mAなので、2倍の定格があれば、ヒータ線の断線による故障はない。また素子を機器に内蔵可能とするためには、3 cm×3 cm以下に小型化する必要がある。 |
|                     | サーマルコンバータの交直差の特性を改善する。標準として利用できるよう、ヒータ抵抗の温度係数は10 ppm/°C以下に抑え、熱的時定数を最適化すること                                                        | サーマルコンバータの低い周波領域ではヒータ線の温度変動とヒータ線抵抗値の変動により、交直差の低周波特性が悪くなる問題がある。抵抗の温度依存を従来の50                                                                                                                                                |

|                     |                                                                                                    |                                                                                                                                                             |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 課題１：薄膜型サーマルコンバータの開発 | で、低周波特性を 10 ppm 以内に改善する。                                                                           | ppm/°Cから 10 ppm/°C以内に改良し、交直差の周波数特性を 10 ppm 以内に抑え、校正事業者の最高測定能力の不確かさ 20 ppm( $k=2$ ) より小さい範囲内に設定する。                                                           |
|                     | サーマルコンバータを薄膜化することにより、作製の歩留まりが悪く、製品化の支障になる可能性がある。歩留まりを 9 割以上に向上する作製方法を開発する。                         | 薄膜型サーマルコンバータの製品化の際、普及のネックの一つに価格の問題がある。歩留まりが悪い場合、人件費により、作製コストの上昇となる。従来のサーマルコンバータの価格と同程度にするのに、歩留まりを 9 割以上に向上する。                                               |
|                     | サーマルコンバータの劣化防止を行う。サーマルコンバータのヒータの発熱による材質の劣化が予想される。10 年間にわたり使用可能で、経年変化が 3 ppm 以下のサーマルコンバータの素子の開発を行う。 | 交流電圧の基準となるサーマルコンバータの経年変化や劣化防止の対策は、校正の信頼性のキーポイントである。リアルタイム・キャリブレーション技術では、5 年間校正不要な装置を目標としており、サーマルコンバータは 10 年間使用可能な素子を開発する。現在の交直差の不確かさを考慮し、経年変化は 3 ppm 以内とする。 |
| 課題２：複合量任意信号源回路の開発   | サーマルコンバータを利用した高精度任意信号発生装置の開発を行う。任意発生器でサーマルコンバータの交直差を参照として、出力は 1 V～10 V までの電圧を                      | サーマルコンバータを利用した交流電圧標準信号発生装置は開発されていない。現在の交直差測定システムを応用し、出力の参照にサーマルコンバータを利用した標                                                                                  |

|                     |                                                 |                                                                                                                                                                        |
|---------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 課題2：複合量任意信号源回路の開発   | 発生できる装置を開発する。                                   | 準信号発生器の開発をする。<br>基準信号発生器において最も高精度が期待されるのが、1 V～10 V の範囲である。この範囲では、電圧降下の影響や、負荷効果、表皮効果など精度低下の要因の影響が小さい。<br>高精度の信号発生器の開発には、交流電圧標準の上位標準であるサーマルコンバータを利用することで、さらなる精度向上が期待される。 |
|                     | 5 kHz 以下での交流電圧の不確かさが 30 ppm 以内の任意信号発生装置を開発する。   | 交流電圧・電流の周波数範囲としては、商用周波数 50 Hz、60 Hz の 50 次高調波である 3 kHz まで発生することが望まれる。5 kHz 以下の交流電圧の不確かさが 30 ppm 以内であれば、校正事業者と同じレベルでの交流電圧の校正が実施できる。                                     |
| 課題3：小型ジョセフソン電圧標準の開発 | 12 K 程度の温度で動作可能なジョセフソン素子を設計、作製する。               | 液体He フリーで動作可能なジョセフソン電圧発生装置の開発のためには、超伝導転移温度の高いジョセフソン素子の開発が必要である。コンプレッサの冷凍能力から、最低 10 K 以上で動作するジョセフソン素子の設計が必要である。                                                         |
|                     | ジョセフソン装置のシステム制御回路の小型化を行う。要素回路（温度制御回路、バイアス回路、マイク | 産業現場で小型ジョセフソン電圧標準を利用するために、小型化することは重要である。移動が可能で、小型ジ                                                                                                                     |

|                     |                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 課題3：小型ジョセフソン電圧標準の開発 | 口波回路、電圧増倍回路)を開発する。コンプレッサー以外の全ての要素部品を、19 インチの計測ラックに搭載可能な、標準規格の筐体(幅 450 mm 高さ 270 mm 奥行き 500 mm 程度)に収納することを目標とする。                 | ヨセフソン発生装置自体を上位校正機関に持ち運ぶことを可能とするため、小型ジョセフソン電圧標準はシステム制御回路を小型化し、計測ラックに収納可能なサイズとする。                                                                                                                      |
|                     | 液体 He フリーの小型冷凍機を用いたクライオスタットを開発する。10 mK 以下の温度安定性と 10 K まで冷却が可能なクライオスタットを製作する。                                                    | 産業界への小型ジョセフソン装置の普及に際して、液体 He を用いることは、日々の供給や、事故対策、コスト負担の観点から大きな支障となる。液体 He フリーの装置は、産業現場の担当者に余分な負担をかけずに、利用することを可能とする。ジョセフソン素子の安定した動作には、10 mK 以下の温度安定性が必要である。10 K まで冷却可能なクライオスタットを開発し、液体 He 不要のシステムとする。 |
|                     | 開発したジョセフソン素子、システム制御回路、クライオスタットを用いて、ジョセフソン電圧発生装置を完成させる。正常動作の確認を行う自動制御プログラムを開発することにより、直流電圧 1 V において、不確かさ 0.5 ppm 以下での校正能力を持つことを目標 | ジョセフソン電圧が正常に動作していることをプログラムで自動的に確認できれば、使用者は希望の電圧を設定する操作のみである。開発する小型ジョセフソン装置は、ジョセフソン素子列において、他の素子と相互比較することで、素子が正常に動作していることを自動的に確                                                                        |

|                            |                                                                                                            |                                                                                                                                       |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 課題３：小型ジョセフソン<br>電圧標準の開発    | とする。                                                                                                       | 認できるシステムにする。これにより、精密な電圧が発生できる。ジョセフソン電圧発生装置は、0.5 ppm 以下で直流電圧の校正が可能となることで、校正事業者と同じレベルの校正が実施できる。                                         |
| 課題４：電気標準信号発生<br>システムの開発と評価 | 課題２の任意信号発生装置の出力（最大 10 V）を増幅し、100 V までの出力が可能なアンプを開発する。アンプの特性評価を行い、100 V、50 Hz で長期安定度 100 ppm 以下の電圧増幅器を開発する。 | 電圧の範囲については、商用電圧の 100 V まで、発生可能なことが望まれる。この範囲において、校正事業者と同程度の校正能力をもつ装置の開発を行う。不確かさの大きな要因は長期安定度であり、100 V、50 Hz で長期安定度 100 ppm 以下を目指す。      |
|                            | 課題２の任意信号発生装置を用いて、5 A まで電流が発生可能なトランスコンダクタンスアンプを開発する。5 A、50 Hz で長期安定度 100 ppm 以下の電圧－電流変換器を開発する。              | 電流の範囲については、通常のコネクタの使用可能範囲な 5 A まで発生可能である装置を開発する。この範囲において、校正事業者と同程度の校正が可能な装置が望まれる。不確かさの大きな要因は長期安定度であり、5 A、50 Hz で長期安定度 100 ppm 以下を目指す。 |
|                            | 課題１～３のシステムを統合し、産業現場で、直流電圧と交流電圧が校正可能な装置を開発する。電流と電圧は同時に発生可能として、複数電気量の校正が可能なシステムとする。周波                        | 産業現場では、マルチメータなどの複数の電気量を一括して校正することが望まれている。また、製品の性能評価では、校正が 1 点のみでは、性能評価が難しい場合が多い。リアルタイム・キャリ                                            |

|                                  |                                                                           |                                                                                  |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| <p>課題 4 : 電気標準信号発生システムの開発と評価</p> | <p>数 0 kHz～3 kHz、電圧 0 V～100 V、電流 0 A～5 A においてそれぞれ校正された任意の出力値が発生可能とする。</p> | <p>ブレーション装置では、任意点において、校正された値が発生できることが重要である。出力範囲についても、広く利用されている範囲をカバーする必要がある。</p> |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|

### 3. 成果、目標の達成度

#### 3-1 成果

##### 3-1-1 全体成果

計量・計測システム分野の技術戦略マップ（図1-1）において、トレーサビリティの確保、高信頼化、計量標準内蔵が取り上げられている。リアルタイム・キャリブレーション装置は、図2-1にみられるように、産業現場で使える機器にイントリンシックな標準器を組み込んだものであり、世界で初めての成果である。

本事業においては、小型ジョセフソン素子、サーマルコンバータ、任意信号発生装置、アンプを統合したリアルタイム・キャリブレーション装置を完成させた（図3-1）。完成した装置は基本的な電気量である直流電圧・電流、交流電圧・電流の同時校正が可能である。電気量においては、直流電圧標準はツェナー標準電圧発生器、交流電圧標準は交直変換器のように別々の標準器で管理する場合も多く、これらと同等の能力を持ち、電気複数量の一括校正が可能となる装置は、今後の JCSS 制度の普及にとって重要である。また、校正結果は製品の性能評価に用いられることも多い。性能評価には、校正された1点のみでなく、複数の点があることが必要とされる。リアルタイム・キャリブレーション装置は、任意の値を校正して発生することが可能な装置であり、電気量では初めてである。



図3-1 リアルタイム・キャリブレーション装置

開発した装置の特徴のひとつは、利便性を増すようにイントリンシックな標準器の小型化を実現したことである。イントリンシックな標準器を用いることにより、校正の信頼性が向上し、再校正が 5 年の長期にわたり不要となることから、産業現場の負担軽減が可能である。さらに、産業現場で利用できるように、代表的な電気計測器に対応する校正システムの自動化を進めた。自動化により、図 3-2 のように、任意の場所で、任意の時間に、産業の現場で使用する電気計測器の校正や点検が容易に実施でき、現場ユーザー志向の校正システムが実現する。

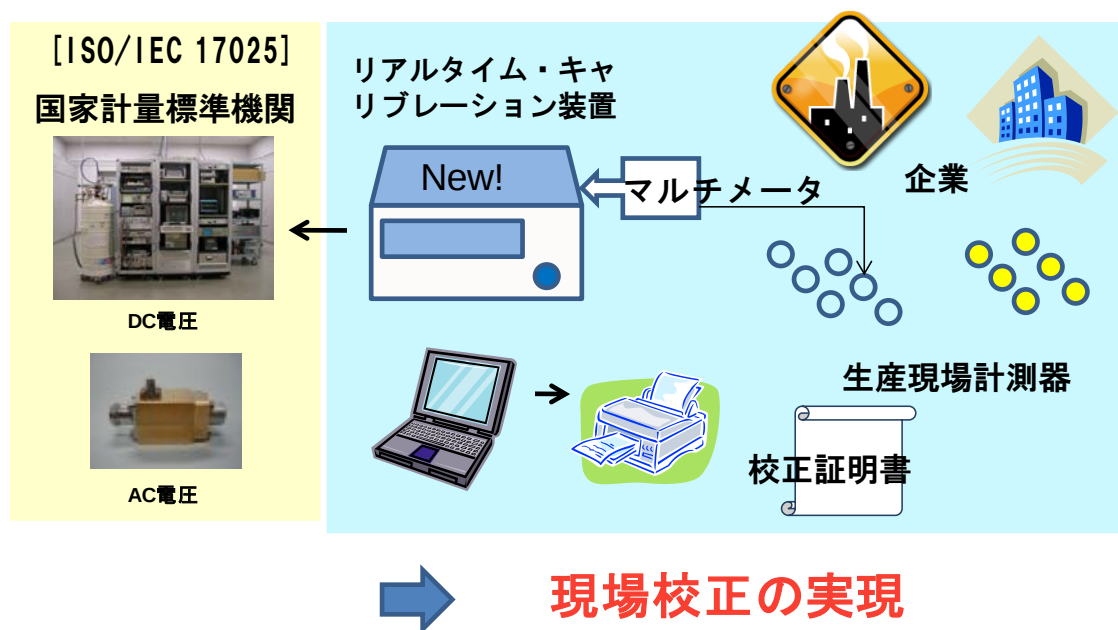


図 3-2 リアルタイム・キャリブレーションの概念図

### 3-1-2 個別要素技術成果

#### (1) 薄膜型サーマルコンバータの開発

交流電圧はサーマルコンバータと呼ばれる熱電変換素子を用いて、熱を介した直流との比較測定によって導かれている。従来から用いられている豆電球型の構造を有する単一熱電対型サーマルコンバータは、周波数特性が大きく、過電流や衝撃に弱い等の欠点を有する。そこで、これらの問題を抜本的に改善するために、耐久性構造を有する薄膜型サーマルコンバータの開発を行った。

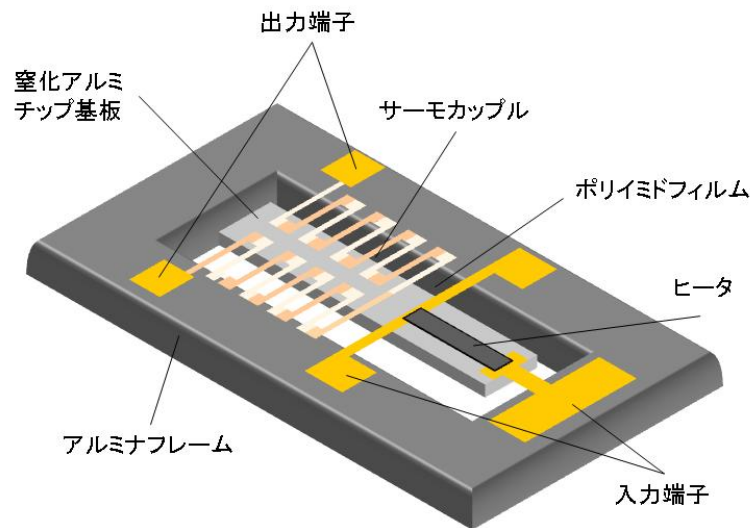


図 3-3 薄膜型サーマルコンバータの模式図

作製した薄膜型サーマルコンバータの設計は次の通りである。ヒータ薄膜は、Ni-Cr 系の合金を用い、 $0.3\text{ mm} \times 1.5\text{ mm} \times 8\text{ mm}$  の窒化アルミ製のチップの上にスパッタ法を用いて形成される。ヒータが製膜された窒化アルミチップは、アルミ製のフレームに支持された  $12\text{ }\mu\text{m}$  のポリイミド膜上に接続される。ポリイミド膜上には、真空蒸着法により熱起電力の大きな半金属からなる 64 対（表面：32 対、背面：32 対）の Bi-Sb 製のサーモカップル、及び電極が形成されている。ヒータラインと電極はフリップチップボンディング法で電氣的に接続されている。Bi と Sb の接合部分に銅を介することで、サーモカップルの出力抵抗を  $400\text{ }\Omega$  程度に抑制している。

一般的なサーマルコンバータの交直差の周波数特性は図 3-4 にみられるような特性を有する。低周波特性を目標とする  $10\text{ ppm}$  以内にするためには、熱的時定数の大きさは 2 秒以上で、ヒータの抵抗の温度係数を  $10\text{ ppm/K}$  以内としなければならない。従来のサーマルコンバータと違い、ヒータと熱電対に別の基板を用いて、別々に作製するように改良したため、温度係数改善のヒータのアニールが可能となった。アニールの条件を詳しく調べることにより、ヒータ抵抗の温度係数は従来のプラスマイナス  $25\text{ ppm/}^{\circ}\text{C}$  から、マイナス  $10\text{ ppm/}^{\circ}\text{C}$  以内に高性能化を達成した。熱的時定数も窒化アルミ基板の大きさを変えることに

より変更が可能で、これも従来のサーマルコンバータにない特徴である。また、ヒータ基板に、絶縁体で、熱伝導率の高い窒化アルミ基板を用いたことで、放熱板の役割を果たし、従来型と比べて、2 倍の定格電流を達成した。

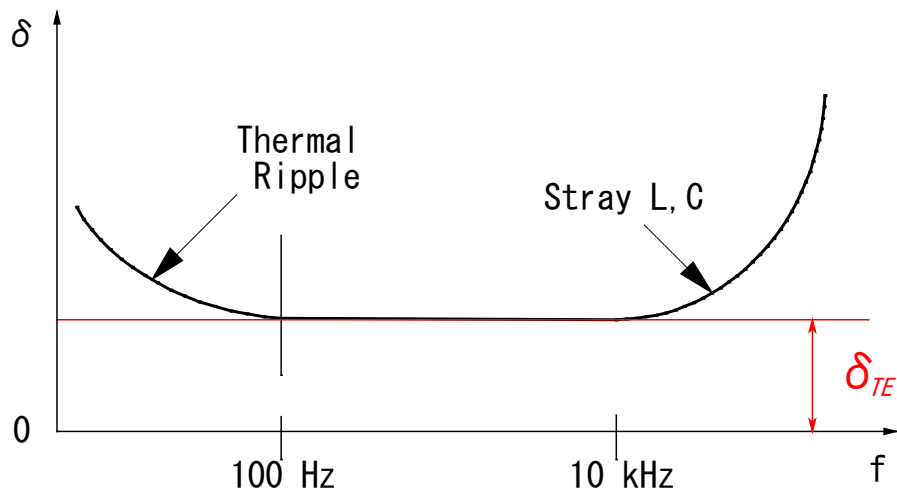


図 3-4 サーマルコンバータの交直差の周波数特性図

設計と作製したサーマルコンバータの設計と結果を表 3-1 に示す。

表 3-1. 薄膜型サーマルコンバータの主要な設計値のまとめ

| 設計パラメータ    | 設計                 | 評価結果     |
|------------|--------------------|----------|
| ヒータ材料      | Ni-Cr 系合金          | -        |
| ヒータ抵抗      | 700 Ω              | 690 Ω    |
| ヒータ温度係数    | 10 ppm/K 以内        | 10 ppm/K |
| サーモパイル材料   | Bi-Sb (Cu)         | -        |
| サーモパイル数    | 64 対 (32 対両面)      | -        |
| 出力抵抗       | 400 Ω              | 432 Ω    |
| 窒化アルミチップ形状 | 1 mm×8.0 mm×0.3 mm | -        |
| 熱時定数       | 2 秒以上              | 3 秒      |
| 感度         | 0.8 mW/mV 以上       | 1 mW/mV  |
| 定格電流       | 20 mA              | 25 mA    |

表 3-1 のサーマルコンバータの周波数特性の測定結果を表 3-2 に示す。

表 3-2. 代表的な周波数における交直差の実測値

| 周波数 $f$ (Hz)                        | 10  | 50  | 1000 | 10000 |
|-------------------------------------|-----|-----|------|-------|
| 交直差 $\delta$<br>( $\mu\text{V/V}$ ) | 9.6 | 6.0 | 0.2  | 0.7   |

表 3-2 にみられるように、10 Hz で 10 ppm 以下、1 kHz で 1 ppm 以下の交直差を達成した。

サーマルコンバータを長期間利用するためには、劣化防止が必要である。高温環境でのヒータ材質、熱電対、各種基板の変化を調べた結果、熱電対の劣化の可能性が判明した。

熱電対の劣化は、直列接続した熱電対の抵抗値（内部抵抗値）の変化として観察することが可能である。熱電対は、製造直後から常温保管の状態で、その内部抵抗値が増加し、最終的には断線に至る。常温保管した熱電対は、図 3-5（左）に示すパターンでは、経時劣化が著しい。一方、図 3-5（右）に示す Cu と Bi の直接接触を避けたパターンでは、経時変化は改善される。

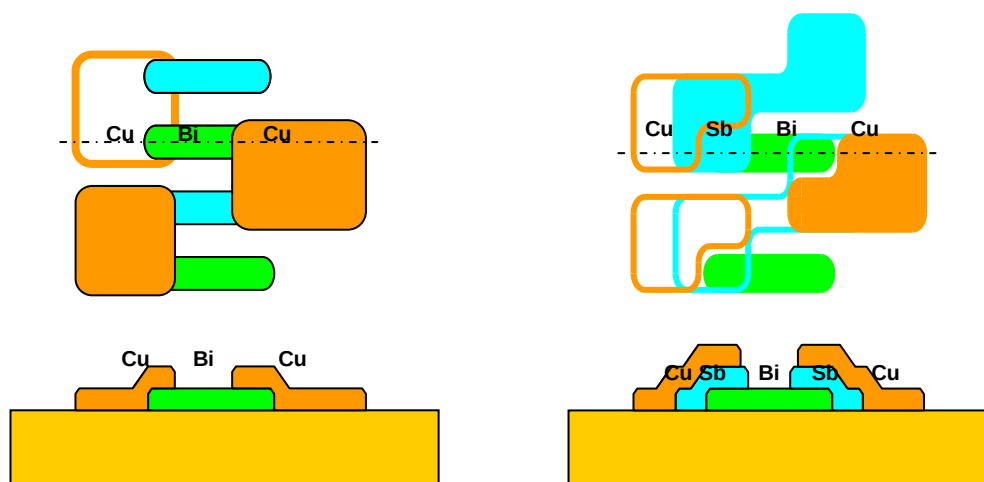


図 3-5 熱電対の劣化が顕著な熱電対パターン(左)、改善した熱電対パターン(右)

改善したパターンでは、常温での熱電対抵抗の増加は観測されておらず、劣化対策が完了したと考える。

サーマルコンバータ素子の寿命は、ヒータ抵抗の劣化ではなく、素子の熱電対の劣化が支配的であることから、素子の熱電対のみを試験試料として準備し、寿命の予想を行った。温度加速による寿命予測は所謂アレニウスモデルが適用できるので、複数の温度条件の試験結果から寿命予測ができる。

温度環境は、 $-15^{\circ}\text{C}$ 、 $+25^{\circ}\text{C}$ 、 $+30^{\circ}\text{C}$ 、 $+40^{\circ}\text{C}$ 、 $+50^{\circ}\text{C}$ 、 $+60^{\circ}\text{C}$ 、 $+70^{\circ}\text{C}$ 、 $+80^{\circ}\text{C}$ 、 $+125^{\circ}\text{C}$ 、 $+155^{\circ}\text{C}$

の 10 種類、時間間隔は、24 時間、48 時間、100 時間、250 時間、500 時間、1000 時間とした。所定の経過時間ごとに取り出して熱電対の抵抗値を測定した。試験の結果、温度-15℃から+40℃までの放置温度での抵抗値の経時変化においては、通常の電子部品の劣化の傾向と同様、経過時間に対して抵抗値変化が安定する傾向がみられた。放置温度+60℃以上では、放置時間 500 時間以内に抵抗値の増加が観測された。ヒータの発熱により、40℃の温度上昇が予想されるため、熱電対膜を 40℃に保ち続けた場合、上記の観測結果から約 8 年で 2 割の抵抗値変化が生じると予想される。サーマルコンバータを 8 年間連続動作させることはないが、2 割の抵抗値変化においてもサーマルコンバータとして使用可能なため、サーマルコンバータの通常の使用範囲においては、10 年間の使用が可能であると推測される。

サーマルコンバータ素子の作製においては、製作の歩留りを向上させるため、熱電対蒸着治具の開発を行った。顕微鏡下における蒸着マスクの人手による位置決め調整では、歩留まりは 8 割程度で、時間もかかる。

図 3-6 にみられる蒸着治具を開発することで、熱電対薄膜のマスク位置合わせの精度を  $\pm 10\ \mu\text{m}$  が達成され、歩留まりも 9 割以上に向上した。

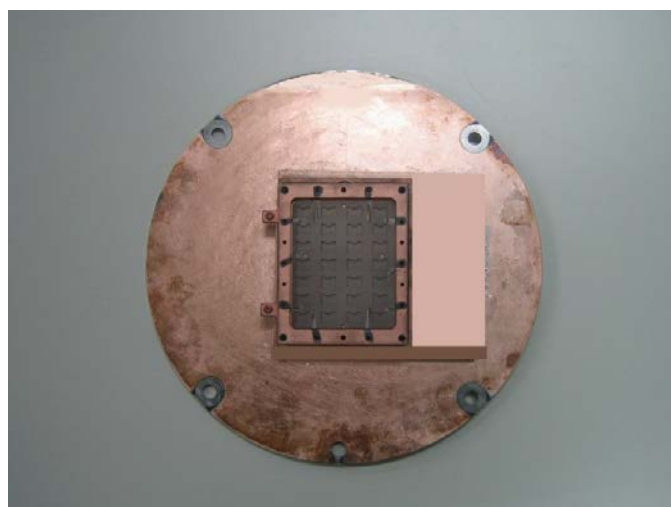


図 3-6 熱電対蒸着治具

以上の改善により、図 3-7 にみられる標準として使用可能な、薄膜型サーマルコンバータを開発した。

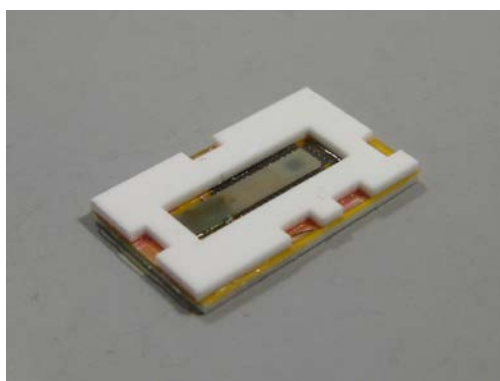


図 3-7 薄膜型サーマルコンバータ

## (2) 複合量任意信号源回路の開発

交直変換標準で用いられているサーマルコンバータは、NIST、PTB など各国の標準機関が維持・管理している。しかし、これまで、サーマルコンバータを装置内部に組み込み、サーマルコンバータの交直差を基準として、交流電圧を発生させるシステムは開発されていない。今回、課題 1 で、サーマルコンバータの小型化と耐久性の向上を実現したことにより、サーマルコンバータを基準とした任意信号発生装置自動補正システム（標準交流電圧発生装置）の開発を行なった。システム構成は、マルチプレクサ、バッファアンプ、エラー解析装置から成る(図 3-8)。

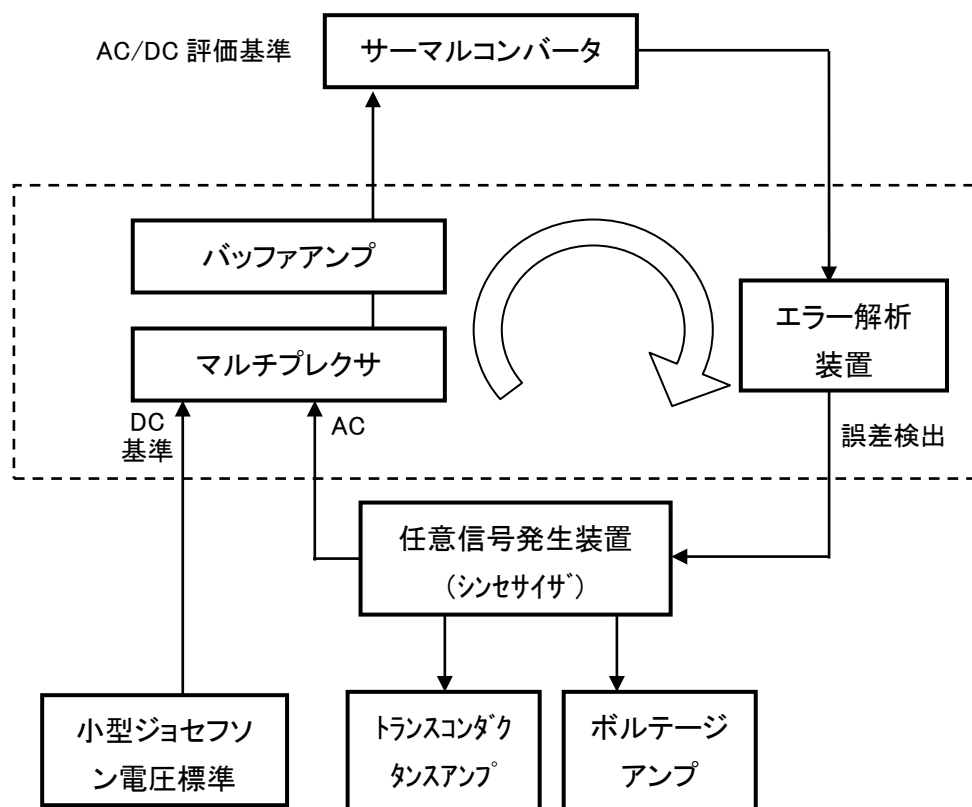


図 3-8 任意信号発生装置自動補正システム

任意信号発生装置自動補正システムの開発にあたり、まずそのシステム開発の上で重要な構成要素となる 2 つの電子回路、マルチプレクサおよび高精度バッファアンプの開発に着手し、その基本回路を設計・製作した。マルチプレクサの基本仕様として、任意信号発生装置の AC 信号と DC リファレンス電圧をゼロクロス時において高速切替可能とし、さらにサンプリング制御に重要なトリガー信号も生成できるようにした。高精度バッファアンプでは、AC 信号と DC リファレンスの電圧値を高精度に保持しながら、サーマルコンバータに流すための電流を供給できる広帯域仕様とした。このような仕様で製作したマルチプレクサとバッファアンプを使用し、サーマルコンバータ、DC リファレンス電圧標準、デジタルマルチメータを組み込むことで、信号発生部の基本動作およびその測定精度を確認した。

任意信号発生装置の交流電圧の不確かさについて、校正事業者と同等の校正能力を実現するため、マルチプレクサのスイッチタイミングの改良を行なった。マルチプレクサが行う処理は大きく分けると、サーマルコンバータへの入力電圧を AC→+DC→AC→-DC→AC の順番で切り替えるためのスイッチング・タイミング制御、及びサーマルコンバータの出力信号をサンプリング制御するために必要なサンプリングトリガ信号の生成の二つがある。

これらの処理を可能とするためには、標準交流電圧発生装置から出力される交流電圧とマルチプレクサの動作処理の両者がお互いに同期している必要がある。そのため、**図 3-9** で示す交流電圧評価測定システムでは、標準交流電圧発生装置とマルチプレクサに 10 MHz の参照クロック信号を入力することで、両者の基本動作において同期がとれるように設定されている。測定開始時のタイミングについては、標準交流電圧発生装置から出力される交流電圧の TTL 同期信号を使用し、立ち上がりエッジのタイミングで測定開始を行っている。また、本プロジェクトで開発したサーマルコンバータの仕様（交流電圧 10 V、ヒーター抵抗 700  $\Omega$ ）に合わせた広帯域回路設計を行い、1 kHz で不確かさ 8 ppm を実現した。最適なサンプリングパラメータ（サンプリング数 25、サンプリング積分時間 (NPLC) = 10）を選定し、50 Hz ～5 kHz の周波数域で不確かさ 15 ppm 以下の任意信号発生装置自動補正システムを完成させることができた(**図 3-10**)。

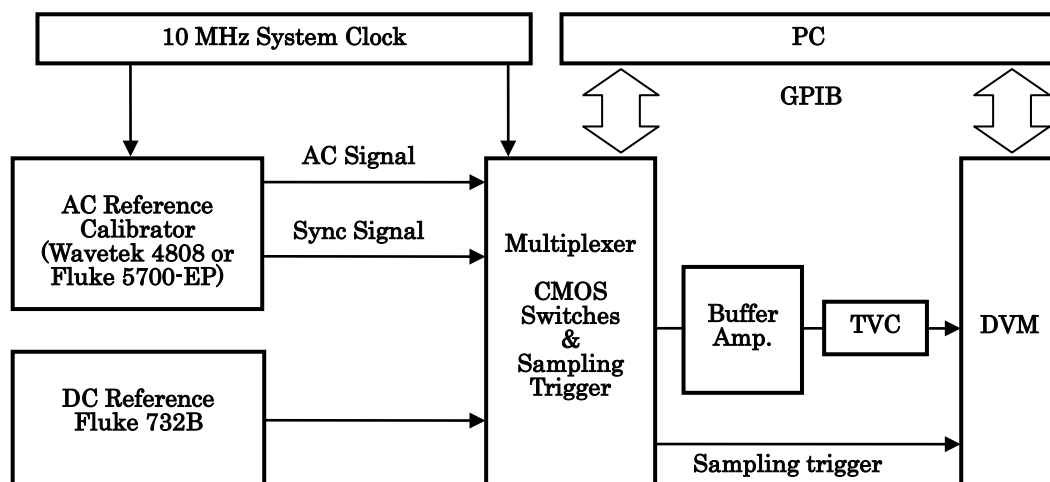


図 3-9 交流電圧評価測定システム  
(TVC: サーマルコンバータ、DVM: デジタルマルチメータ)



図 3-10 任意信号発生装置自動補正システム

### (3) 小型ジョセフソン電圧標準の開発

液体 He フリーで動作可能なプログラブルジョセフソン電圧標準(PJVS)発生装置の開発を行なった。具体的な研究目標として、下記の項目について研究開発を実施した。

- [1] 絶対温度 12 K で動作する窒化ニオブ素子の作成条件の確立
- [2] 小型クライオスタットの開発
- [3] 19 インチ幅の標準筐体に収納可能な制御システムの開発
- [4] ジョセフソン電圧発生装置の自動化

#### [1] 絶対温度 12 K で動作する窒化ニオブ素子の作成

素子開発においては、NbTiN/Ti-TiN/NbTiN 素子の作製を行った(図 3-1 1)。小型冷凍機が十分な冷凍能力を有する 12 K 程度の温度でジョセフソン素子を動作させるための指針を得ることを目的として、素子作成条件の理論的検討及び作成パラメータ探索を行なった。温度の上限を実験的に確認するとともに、PJVS チップを温度 12 K で動作させた場合の動作マージンを温度 10 K の場合と比較検討した。また小型冷凍機の限られた冷凍能力で安定に動作し、良好なマイクロ波応答特性を有する素子実装を実現した。電極の作製条件の最適化、動作温度の最適化、作製プロセスの見直し等の効果を検証し、本研究で利用可能な欠陥率 12.5%以下のチップにおいては 52%の高い作製歩留を達成した。

図 3-1 2 に 32768 個の NbTiN/Ti-TiN/NbTiN ジョセフソン接合を含む電圧標準用アレーの測定温度 7.9 K における電流電圧特性を示す。与えたマイクロ波は周波数 16 GHz で電力 23 dBm である。接合のサイズは 1 辺が  $2.8 \mu\text{m}$  の正方形で、接合の臨界電流密度は約  $94 \text{ kA/cm}^2$  である。挿入図には平坦なシャピロステップが約 0.5 mA の電流幅で得られることを示しており、電圧標準用デジタルアナログ変換器として十分な動作マージンを得ることが可能である。

素子作成の結果をまとめる。(1) ストレスの小さい多結晶 NbTiN 薄膜において、 $T_c=14.7 \text{ K}$ 、抵抗率  $103.5 \mu\Omega\text{cm}$  の値を得る条件を見出した。(2) この薄膜と Ti-TiN 常伝導層を用いてジョセフソン接合を試作し、32768 個のジョセフソン接合を含む電圧標準用アレーにおいて 1 V のシャピロステップを 0.5 mA の電流幅で得ることに成功した。(3) NbTiN 薄膜は、電圧標準用の材料としても小さい抵抗率、高い  $T_c$  をもち、電圧標準用の回路においても有望な材料であることを示すことができた。図 3-1 3 は開発したジョセフソン素子である。

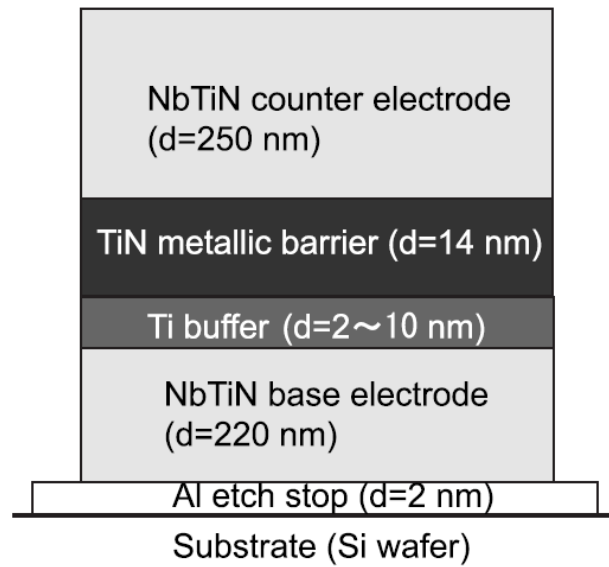


図 3-1 1 NbTiN/Ti-TiN/NbTiN ジョセフソン接合の断面図

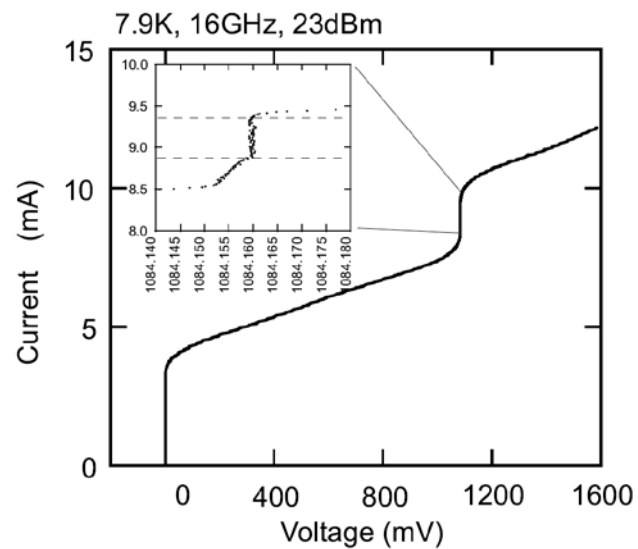


図 3-1 2 バイナリ D/A 回路 (NbTiN/Ti-TiN/NbTiN 接合アレー) の出力電圧



図 3-13 電圧標準チップ写真 (14.7 mm×4.7 mm)

## [2] 小型クライオスタットの開発

素子冷却のために使用する CTI 社 Model122 型極低温冷凍機は、3 サイクル/秒の比較的早い周期で GM 冷凍サイクルを行う。そのため、一般的な 1 サイクル/秒の冷凍機と比較して周期的温度振動がやや軽減されているものの、15 K ステージ部分では 10 mK 以上の温度変動を発生するため、PJVS 素子の動作に対しては無視できない障害となる。従来の PJVS 用クライオスタットでは、サンプルステージとコールドヘッド間に円盤状のステンレスのシムを挿入し、熱抵抗を大きくすることにより温度変動を減少させているが、それでもサンプル位置において最大 100 mK<sub>p-p</sub> 程度の周期的温度変動が生じる。その結果、温度変動が一次の定電圧ステップの端部のラウンディングを引き起こし、ステップ幅を 0.2 mA 程度減少させてしまう問題があった。今回使用する小型の極低温冷凍機は冷凍能力に余裕がないため、熱抵抗を大きくして温度変動を抑える代わりに、10 K においても比較的大きな比熱を有している鉛のブロックをコールドヘッドに付加して、温度変動を軽減する方法を試みた。クライオスタットの構造図を図 3-14 に示す。

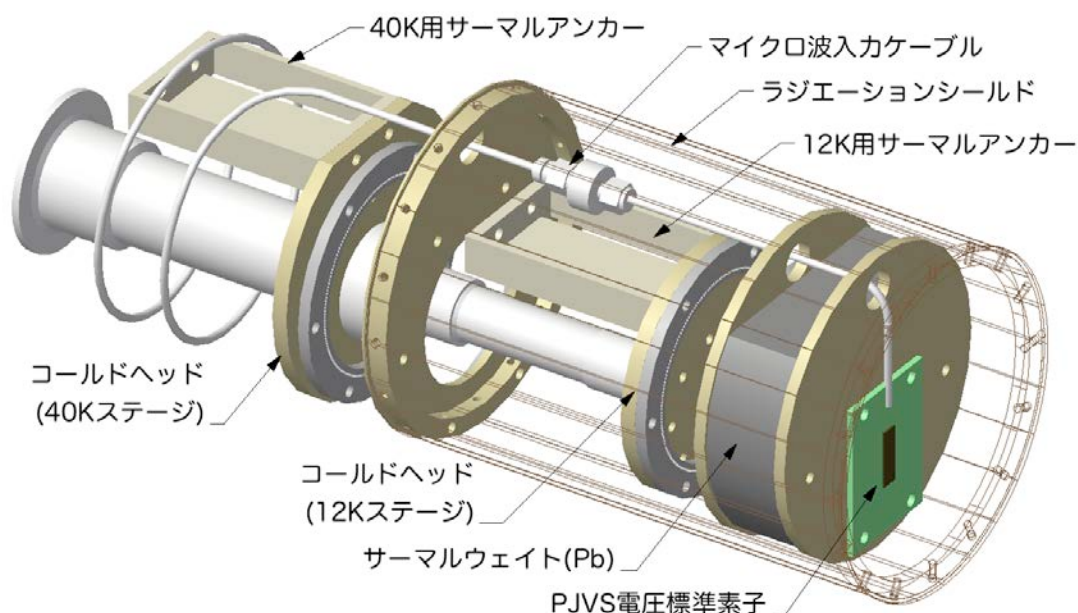


図 3-1 4 クライオスタットの構造

鉛は、10 K 付近においては他の物質と比較して例外的に大きな  $1.6 \times 10^5 \text{ J K}^{-1} \text{ m}^{-3}$  の比熱を有しており、極低温冷凍機の蓄冷材として用いられている。今回のクライオスタットには、直径 70 mm 高さ 10 mm の鉛製の円柱形ブロックを、3 mm 厚の銅板でサンドイッチ状に挟み込んで半田付した構造のサーマルウェイトを使用した。この円柱形ブロックの比熱は 10 K 付近において約 6 J/K と見積もられる。このサーマルウェイトの重量は約 500 g に達するが、コンパクト PJVS システムの場合には冷凍機が横置きとなるため、二段目のディスプレイサ部分の変形が懸念される。サーマルウェイトを 12 K ステージと熱的にカップルさせて、かつ機械的には切り離すために、12 K ステージの熱伝達用には、長さ約 30 mm の銅網線を 12 本並列に使用したフレキシブルな「サーマルリンク」を用いた。サーマルウェイトの重量は、同じくフレキシブルな「サーマルリンク」によって 40 K ステージに熱的に結合させたラジエーションシールドを介して、さらにその外側の FRP パイプによって支えられる構造となっている。このサーマルリンクの熱伝導は、トータルで約 1 K/W と見積もられる。従って試料ステージにおいては、約 10 秒の熱時定数が期待され、熱振動は 1/100 以下に軽減されると期待される。

一方、今回使用する極低温冷凍機の冷凍能力の制限と、サーマルリンクの熱抵抗の存在により、試料ステージへの熱流入をできる限り軽減することも重要である。そのため、リード線および RF 同軸ケーブルの 40 K ステージおよびコールドヘッド(12 K)におけるサーマルアンカーへの十分な配慮が必要となる。そこで、今回製作したクライオスタットでは、4 層 0.6 mm の薄型プリント基板によりサーマルアンカーを形成して用いた。

### [3] 19 インチ幅の標準筐体に収納可能な制御システムの開発

システム開発においては、システム制御回路の小型化を行い、要素回路（温度制御回路、バイアス回路、マイクロ波回路、電圧増倍回路）の開発を行なった。

#### (a) 温度制御回路 (TEMP) モジュールの試作

ジョセフソン素子は、極低温における温度リップルに影響を受けるため、独自に専用の温度コントローラの開発を行っている。今回は、この専用温度コントローラ回路を応用し、パッケージングを工夫することで、コンパクト化された温度制御回路 (TEMP) モジュールを製作した。

ヒートシンク付きの小型ケース (TAKACHI HY-23-23-70) 内に組み込まれた温度制御回路 (TEMP) モジュールの写真を図 3-15 に示す。温度制御回路は、オプトカプラにより互いに電氣的に絶縁された (a) USB インターフェイス回路部と、(b) メイン制御回路部から構成されている。さらにメイン回路部は (1) ロジック回路用電源回路、(2) アナログ回路用電源回路、(3) 電源周波数検出回路、(4) 温度測定用 ADC 回路、(5) 温度測定・ヒーターレベル設定用 DAC 回路、(6) ヒーター電流出力回路の 6 要素回路から構成されている。USB インターフェイスモジュールには、FTDI 社の FT245R と Microchip Technology 社の PIC16F877 をモジュール化した基板を用いた。



図 3-15 TEMP モジュール (温度制御回路)

PIC 用ファームウェアでは、温度の自動制御を行うために、電源に同期して 200 ms (167 ms) 毎にハードウェア割り込みが行われ、温度データから PI 制御によってヒーター電流へのフィードバックコントロールが行われる。冷凍機のコールドヘッドに取り付けられた鉛ブロックの比熱を利用したサーマルウェイト効果により温度リップルの低減を行うことで、電源周波数に同期した周期加熱制御機能を省くことができた。温度制御回路および制御プログラムの動作を検証するために、銅ブロックに Si ダイオード温度センサーとヒーター抵抗を取り付けたダミーを用意し、フィードバックが正常に行われることを確認し、10 mK 以下の温度安定性を実現した。

#### (b) バイアス回路 (BIAS) モジュールの試作

従来の直流電圧標準用 PJVS システムでは、サンジェム社の PJVS04-DC-10-24 型バイアス電源装置を用いてきた。今回は、基本的には同じ出力回路構成を踏襲しているが、(1) 出力ショートリレー基板を廃止して DAC 基板に Photo-MOS リレーを内蔵し、(2) 出力電圧 (コンプライアンス) を 10 V 出力対応から 2V 出力対応に変更し、(3) DAC 基板を直流専用最適化し、(4) インターフェイス回路をシリアル通信型に変更し、(5) 出力チャンネル数を 24 チャンネルから 16 チャンネルに変更する等の設計変更を行って、コンパクト化を実現している。

新たに製作したバイアス回路 (BIAS) モジュールの写真を図 3-16 に示す。写真に示すように、温度制御回路 (TEMP) モジュール同様に放熱板付きのアルミケース (TAKACHI HY-23-23-99) を採用することにより、筐体容積を従来と比較して 1/4 以下に抑えた。筐体内には電源回路の他にコントロール基板と 4 枚の DAC 基板が納められている。コントロール基板には、他のモジュール同様に、FTDI 社の FT245R と Microchip Technology 社の PIC16F877 をモジュール化した USB インターフェイス基板を用いている。4 チャンネル DAC 基板は、回路構成は従来と同様であるが、オーストラリア国立標準研究所 (NMIA) において考案された新規の電流出力回路を採用して部品点数を減らした。従来とほぼ同サイズの基板に、出力ショート/アイソレート用リレー Photo-MOS リレー 10 個とオプトカップラを収納している。その結果、コントロール基板のサイズを従来の 1/2 以下に削減することができた。

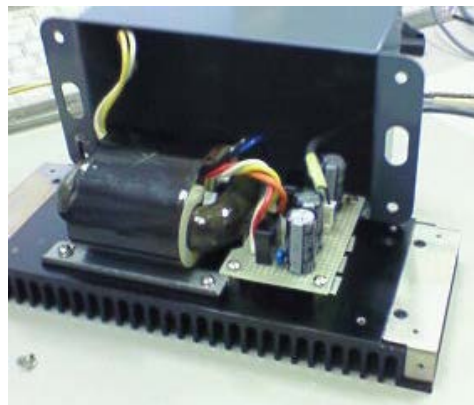


図 3-16 BIAS モジュール(下は電源回路部)

一方、最もシステムのコンパクト化に貢献しているのは電源回路である。電源電圧を従来の $\pm 18\text{ V}$  から $\pm 8\text{ V}$  に変更し、インターフェイス回路を省電力化(低速化)し、また出力チャンネル数を 16 チャンネルに変更した結果、必要な電源容量は従来の約 50 W から 10 W 以下に削減された。このため、右側の写真に示されるような、比較的小型の R-コアトランスを使用することが可能となった。モジュールの制御には、上記の USB インターフェイスモジュールに組み込まれるファームウェアと、PC にインストールされて USB インターフェイスを介して PIC マイクロコントローラを制御する VB ソフトウェアが組み合わせて用いられている。

#### (c) マイクロ波回路(RF)モジュール

これまでの冷凍機搭載型の PJVS システムでは、主としてアルモテック社の 16 GHz マイ

クロ波ソースを採用してきた。今回は、ほぼ同じ回路構成で、パッケージングを工夫することにより、コンパクト化を目指した。一方、スイッチング電源の発生する高周波ノイズを軽減するため、コンパクト化には逆行するが、ソフトスイッチングタイプの超低ノイズ型電源とシリーズレギュレータ回路を採用した。

RF モジュールの写真を図 3-1 7 に示す。マイクロ波回路の構成は、上限周波数 2.5 GHz の PLL 周波数シンセサイザの 2 GHz 出力を、アッテネータ機能付きの 4 通倍器で 8 GHz に変換した後、さらに 2 通倍器で 16 GHz に変換し、16 GHz アンプで最大 500 mW に増幅して出力している。これらの部品間は、セミフレキシブルケーブルを用いて配線した。PLL 周波数シンセサイザとアッテネータ機能付きの 4 通倍器の制御には、新規に開発した専用の制御基板を用いている。放熱版付きのアルミケース (TAKACHI HY-23-23-99) を採用することにより、部品の発熱による温度上昇の問題を回避して、ファンレスで 1/2 以下の筐体容積を実現している。



図 3-1 7 RF モジュール(マイクロ波出力回路)

#### (d) 電圧増倍回路 (VMx10) モジュールの試作

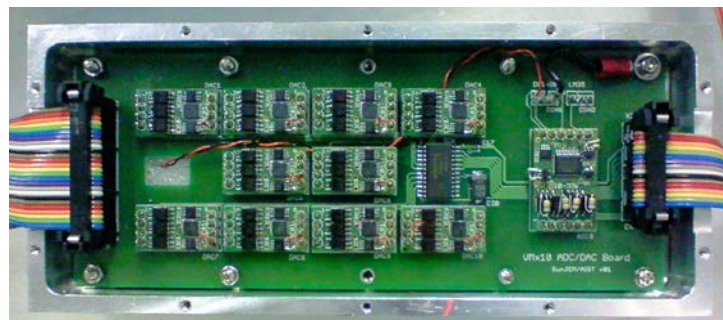
製作された 電圧増倍回路 (VMx10) モジュールの写真を図 3-1 8 に示す。鉄製のシールドボックス内に、小型トランスによって絶縁された 10 個の低ノイズ電源が搭載されている。高周波ノイズの発生を抑えるために、スイッチングレギュレータを使用しない回路構成を採用した。



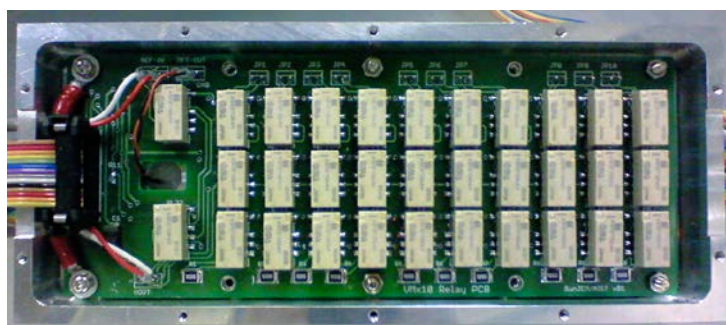
図 3-1 8 VMx10 モジュール電源回路

図 3-1 9 (a) は DAC/ADC 回路基板の写真であり、10 個の独立した DAC 回路と、精密 ADC 回路がそれぞれモジュールとして搭載されている。DAC 回路には、TI 社の高精度 18bit-DA コンバータ ADC9881 を用いている。また ADC 回路には、シーラスロジック社の  $\Sigma \Delta$  変換型 24bit 精密 AD コンバータ CS5532 を用いた。各 DAC 回路と ADC 回路の制御は、オプトカプラーで光絶縁し、電源回路もそれぞれ互いに絶縁されている。他のモジュール(RF, TEMP, BIAS)の制御と同様に、VMx10 モジュールの制御には、上記 USB インターフェイスモジュールの PIC マイクロコントローラに組み込まれるファームウェアと、PC にインストールされて USB インターフェイスを介して PIC マイクロコントローラを制御する VB ソフトウェアが組み合わせて用いられている。

一方、図 3-1 9 (b) に示されるリレー回路基板には、低熱起電力型リレーとして知られているパナソニック電工製の SX リレーの一巻線ラッチング型を 32 個使用した。これらのリレーの熱起電力の安定度および再現性は、十分に温度安定化された状態においては、10 nV 以下と評価されている。これらのリレーを用いて、DAC 回路出力の直列接続／並列接続および正出力／負出力の切り替えを行っている。



(a)



(b)

図 3-19 電圧増倍回路基板

(a: DAC/ADC 回路基板, b: 低熱起電力リレー回路基板 )

製作した電圧増倍回路の動作試験を行った所、正常な動作が確認された。  
これらの成果により、現在の最小のデスクトップ型機と比較して、容積比で 1/2 以下で、かつ 19 インチサイズの計測ラックに収容可能な、幅 431 mm 高さ 249 mm 奥行き 550 mm の小型ジョセフソン電圧標準システムを実現した(図 3-20)。



図 3-20 小型ジョセフソン電圧標準システム

#### [4] ジョセフソン電圧発生装置の自動化(制御プログラムの開発)

製作した小型ジョセフソン電圧標準システムに搭載された各制御モジュールを総合的にコントロールするための、総合制御プログラムの開発を行った。総合制御プログラムは、装置本体のフロントパネルに組み込まれたタッチパネル式の PC に搭載され、Windows XP を OS として、Microsoft Visual Basic 2008 で生成されたコードによって、スタンドアローン・アプリケーションとして動作する。

各モジュール(RF モジュール、TEMP モジュール、BIAS モジュール、RF モジュール、VMx10 モジュール)の制御は、各モジュールの USB インターフェイスモジュールを介して、それぞれの PIC マイクロコントローラに組み込まれたファームウェアとコマンドおよび応答を送受信することによって行われる。PC にインストールされた総合制御プログラム内には、各モジュールを制御するための仮想計測器タイプのユーザーインターフェイスが組み込まれ、USB インターフェイスを介して制御が行われている。

小型ジョセフソン装置電源投入すると、図 3-2 1 の画面が立ち上がる。” Start” ボタンあるいは” Proceed” ボタンをタッチすることで、装置の初期化が下記の各ステップの順に行われる。

- (1) 温度測定／温度制御用の TEMP モジュールの初期化。
- (2) 冷凍機の圧力、冷却水、クライオスタット真空度の確認  
--- ここではマニュアル入力が必要。
- (3) クライオスタットの冷却過程のモニター。
- (4) 極低温(12 K)到達後に、” Proceed” ボタンにより次のステップへ。
- (5) BIAS モジュール、RF モジュール、VMx10 モジュールの初期化。  
---各モジュールの電源を ON にして初期化。

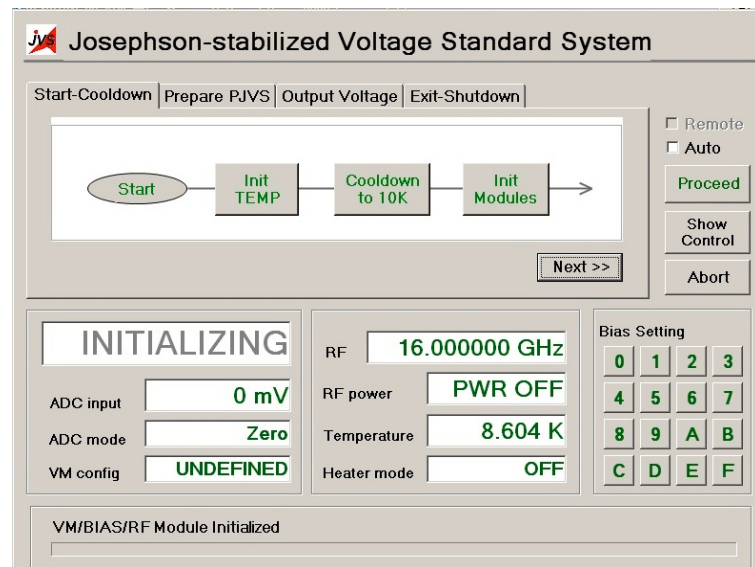


図 3-2 1 ジョセフソン電圧発生装置の初期化画面

各モジュールの初期化が終了すると、動作マージン最大化のユーザーインターフェイス画面に自動的に遷移する。ここでは、動作マージンを最適化するための操作が下記の順に行われる。一回で安定動作に必要な動作マージンが得られない場合には、必要な動作マージンが確保されるまで、(1)から(3)の操作を繰り返して行う。

- (1)      トラップ除去” Detrap” 操作
  - 素子の温度を一旦超電導転移温度以上に上げて、再度 12 K まで冷却する。
- (2)      動作温度および RF パワーの最適化。
  - 素子の I-V 特性に応じて、最適な動作温度および RF パワーに調整する。
- (3)      バイアス電流の動作点の最適化。
  - 素子の各アレーの一次定電圧ステップの位置を確認。
  - 安定動作に必要な  $\pm 0.2$  mA の動作マージンを確認。
  - バイアス電流を、一次定電圧ステップの中心値にセットする。

動作マージンの最適化が終了し、安定動作に必要な動作マージンが確認された時点で、図 3-2 2 の電圧発生／校正用画面に移行し、電圧の発生および校正が下記の順に行われる。

- (1)      出力電圧値の設定
  - 出力電圧の目標値および電圧増倍比の設定を行う。
  - RF 周波数およびアレーの選択が自動的に行われる。
- (2)      定電圧ステップの平坦性チェック。
  - バイアス電流を  $\pm 0.1$  mA 変化させて、出力電圧が変化しないことを確認。

- (3) DAC 出力電圧の校正。
- ―― 各 DAC 出力を並列接続して、出力電圧の平均値を測定する。
  - ―― 熱起電力を相殺させるために、正出力、負出力でそれぞれ行う。
- (4) 電圧の出力。
- ―― 校正された各 DAC 直列接続して、前面パネル端子から出力する。
  - ―― 熱起電力を相殺させるために、正出力、負出力でそれぞれ行う。

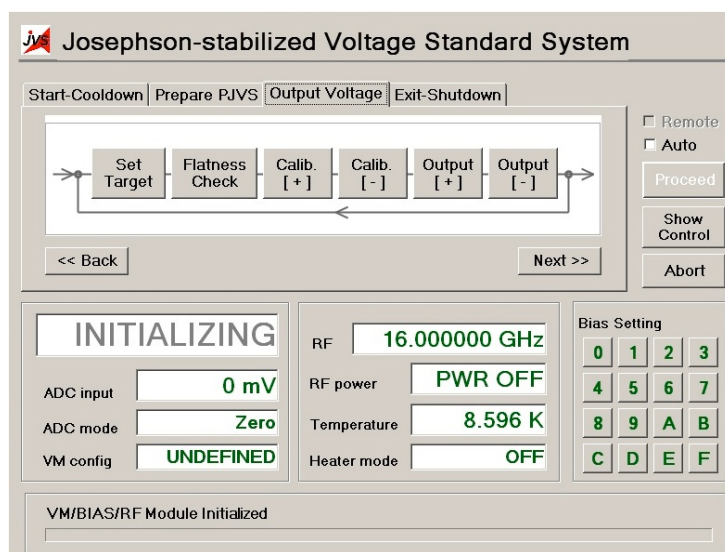


図 3-2 2 電圧発生／校正用画面

以上の、プログラムを開発することにより、小型ジョセフソン装置の自動化が実現した。

#### (4) 電気標準信号発生システムの開発と評価

下記の項目について研究開発を実施した。

- [1] 増幅器の開発
- [2] 統合システムの開発
- [3] 複合量電気標準信号発生システムの安定度評価

##### [1] 増幅器の開発

電圧－電流変換装置及び電圧増幅器を試作し、電圧－電流変換係数、電圧増幅率、経年変化特性を評価し、電圧－電流変換装置及び電圧増幅器を開発した。

全体の構成を図 3-2 3 と図 3-2 4 に示す。本回路では、入力された信号はプリアンプ部に加えられる。この電圧は直流安定化積分器により DC アシストされた誤差増幅器を経て、終段駆動回路から一定のオフセットを持ったドライブ信号が出力される。この信号によっ

て、最終段の高電圧高電流増幅器最終段のパワーFET回路で電流出力が行われる。高電圧高電流増幅器はフローティング電源によって駆動されており、出力信号に重畳した形で高電圧が発生する。出力電流、電圧はそれぞれの検出回路で正規化され、出力を安定するように誤差増幅器にフィードバックされている。

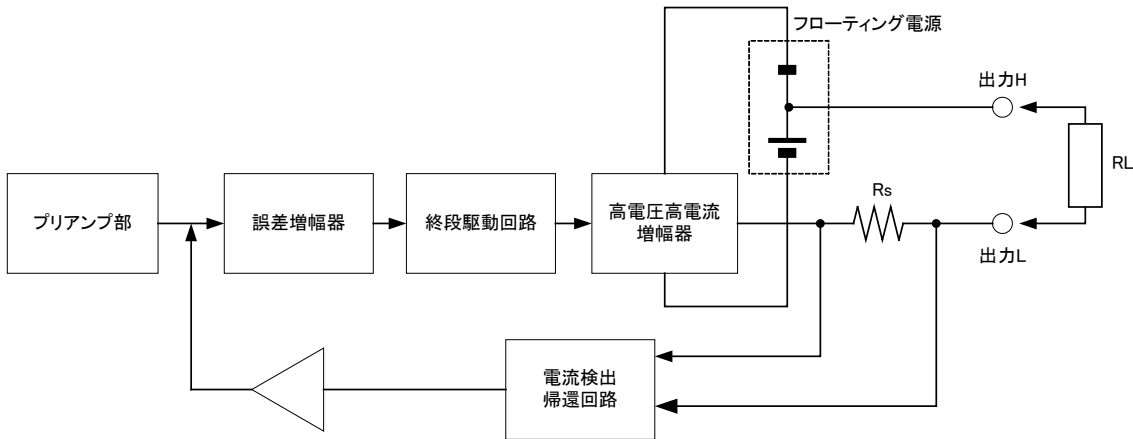


図 3-2 3 電圧－電流変換器主要構成部分のブロック図

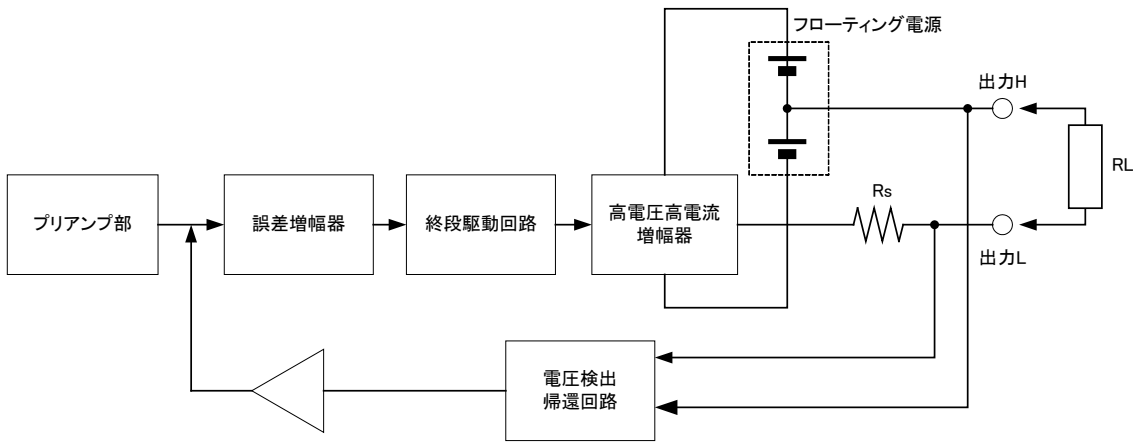


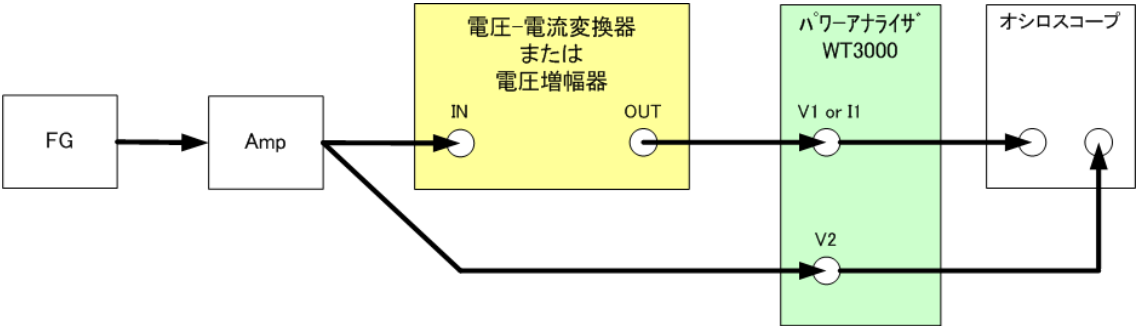
図 3-2 4 電圧増幅器主要構成部分のブロック図

電圧－電流変換器及び電圧増幅器それぞれについて、経時変化の少ない安定な回路設計を行い、シミュレーションによる安定化回路の動作解析を実施し、回路素子の選定などを行った。また、シミュレーション結果を確認するために評価ボードを作成してその動作に関する評価も行った。表 3-3 は目標仕様である。

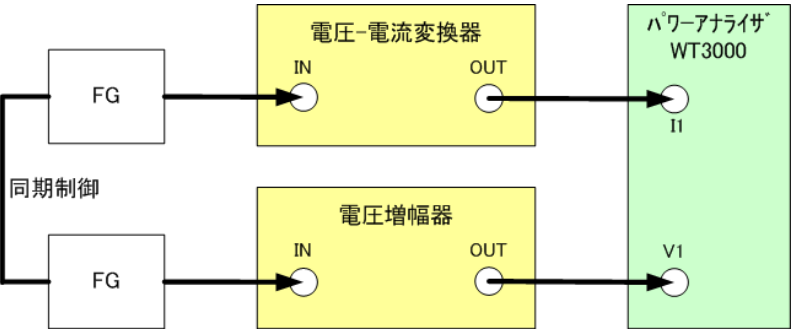
表 3-3 電圧－電流変換器及び電圧増幅器の目標仕様

|          | 出力範囲     | 周波数帯域     |
|----------|----------|-----------|
| 電圧－電流増幅器 | 5 Arms   | DC～10 kHz |
| 電圧増幅器    | 120 Vrms | DC～10 kHz |

制作した試作器の評価方法を図 3-25 に、評価項目を表 3-4 に示す。評価には、横河電機製パワーアナライザ WT3000 を使用し、入力電圧 (V2) と出力電流 (I1)・電圧 (V1) を同時に測定し、その比から電圧-電流変換率及び、電圧増幅率を求める。すなわち、電圧-電流変換率= $I1=V2$ ， 電圧増幅率= $V1/V2$  となる。



(a) 位相安定性以外の評価方法



(b) 位相安定性の評価方法

図 3-25 増幅器の評価方法

表 3-4 評価項目一覧

| 評価項目        | 評価内容                                                                                                         |      |                                                  |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------------------------------------------------|
| 精度試験        | (目的) 増幅率・変換率の測定<br>(条件) 入力は定格の 25%, 50%, 75%, 100% @50 Hz                                                    |      |                                                  |
| スタートアップドリフト | (目的) 電源 ON 後の変動測定<br>(条件)<br>入力：定格の 100% @50 Hz<br>測定時間：電源 ON 後 1 分間隔で 2 時間                                  |      |                                                  |
| 温度特性        | (目的) 温度変化率の測定<br>(条件)<br>入力：定格の 100% @50 Hz<br>温度：23 °C→18 °C→23 °C→28 °C→23 °C                              |      |                                                  |
| 周波数特性       | (目的) 周波数による変化率の測定<br>(条件)<br>入力：定格の 100%, 70%, 50%, 10%<br>周波数：50 Hz, 150 Hz, 500 Hz, 1 kHz～10 kHz は 1 kHz 毎 |      |                                                  |
| 短期安定性       | (目的) 増幅率・変換率の安定性の測定<br>(条件) 入力：定格の 100%@50 Hz                                                                | 測定時間 | 電源 ON、2 時間後から 24 時間                              |
| 長期安定性       |                                                                                                              |      | 電源 ON、2 時間後から 1000 時間（電圧-電流変換器）または 500 時間（電圧増幅器） |
| 位相安定性       | (目的)<br>電圧-電流変換器と電圧増幅器の入力が同時されているときの出力の位相差の安定性の測定<br>(条件)<br>入力：定格の 70%@50 Hz, 位相差およそ 90deg                  |      |                                                  |

評価結果を表 3-5 に示す。

表 3-5 評価結果一覧

| 評価項目        | 結果                |                   |
|-------------|-------------------|-------------------|
|             | 電圧-電流変換器          | 電圧増幅器             |
| 精度試験        | 0.5 (-0.25~-0.2%) | 10 (-0.07%)       |
| スタートアップドリフト | 50 ppm @30min     | 短期安定性に含まれる        |
| 温度特性        | 7 ppm/°C          | 3 ppm/°C          |
| 周波数特性       | -1 dB 以下@10 kHz   | -1.5 dB 以下@10 kHz |
| 短期安定性       | ±20 ppm           | ±10 ppm           |
| 長期安定性       | 55 ppm@1000 h     | 65 ppm@500 h      |
| 位相安定性       | 力率±0.0001 以下      |                   |

電圧-電流変換装置及び電圧増幅器を試作し、電圧-電流変換係数、電圧増幅率、経年変化特性を評価した。その結果、開発仕様の性能をもつ電圧-電流変換装置及び電圧増幅器を完成することができた。

## [2] 統合システムの開発(制御プログラムの開発)

複合量電気標準信号発生システムを動作させる制御プログラムの大きな役割は、任意信号発生装置と自動補正システムとの連動である。標準直流電圧とサーマルコンバータを利用した補正が行えるように、任意信号発生装置の制御とともに、自動補正システム内のマルチプレクサおよびナノボルトメータの制御、エラー解析・補正を自動で行うプログラムを開発した(図 3-26)。

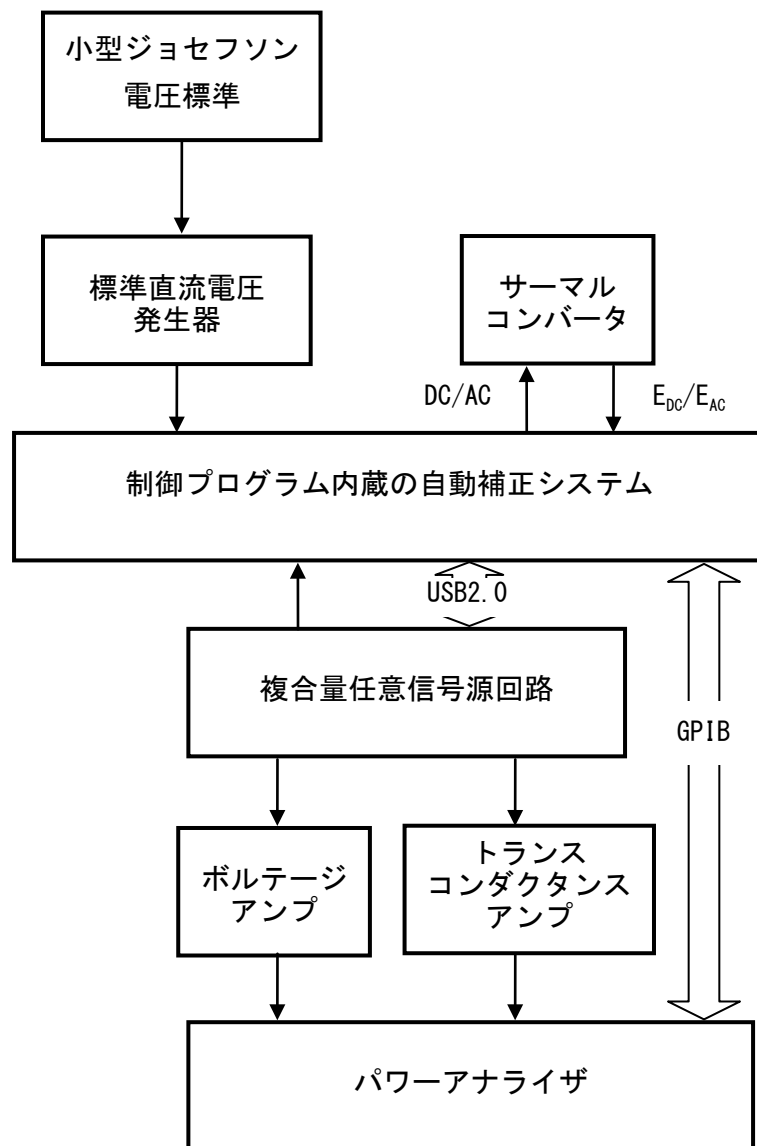


図 3-2 6 実際に構築した複合量電気標準信号発生システム

図3-26に示す複合量電気標準信号発生システムの概念図では、標準DC信号およびサーマルコンバータを利用した自動補正システムにより、複合量任意信号源回路のAC信号の振幅値が補正される。具体的には、複合量任意信号源回路のAC信号は、標準DC信号（基準電圧）とマルチプレクサで切り替え、バッファアンプを介してサーマルコンバータによる熱的比較を行い、エラー解析装置でAC信号の振幅値誤差を算出する。算出された振幅値誤差は複合量任意信号源回路にフィードバックされ、トランスコンダクタンスアンプおよびボルテージアンプへ入力する際には、誤差補正された信号がそれぞれ出力される。

自動補正プロセスを行う制御プログラムの開発には、以下の制御が求められる。

- ① 複合量任意信号源回路の出力制御・補正処理制御
- ② マルチプレクサの動作タイミング制御・切替制御・外部トリガ設定
- ③ ナノボルトメータのサンプリング制御・データ転送

さらに、ボルテージアンプおよびトランスコンダクタンスアンプの出力を基準として、パワーアナライザの評価試験をするために、

- ④ パワーアナライザのリモート計測制御

が必要となる。以上の仕様に基づき、制御プログラムを LabVIEW (National Instruments 社製) 環境で開発した。マルチプレクサの動作制御は、内部のマイクロコントローラのファームウェアをアップデートし、LabVIEW によるリモートコントロールを可能とした。任意信号発生装置の制御では、ドライバーの DLL ファイルを使用することで、同様に LabVIEW によるリモートコントロールを可能とした。図3-27は、制御プログラムのトップパネルである。

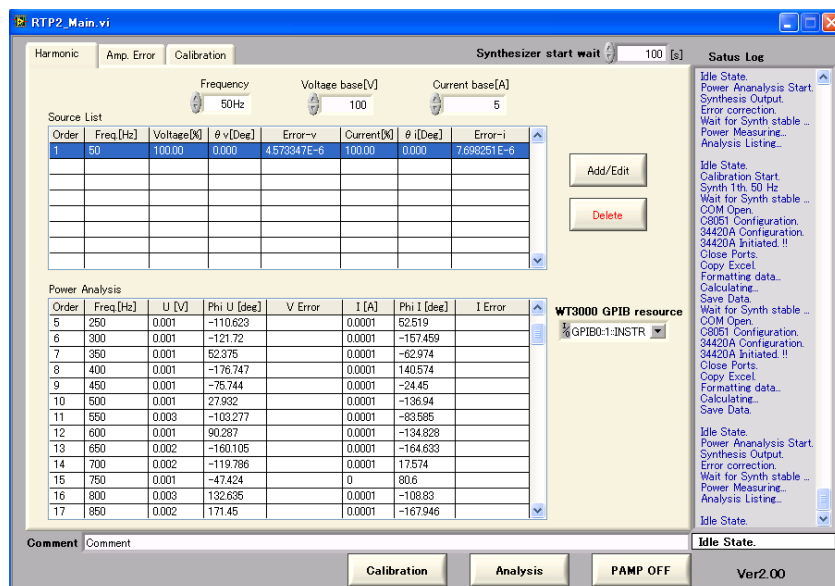


図3-27 制御プログラムのトップパネル

### [3] 複合量電気標準信号発生システムの安定度評価

ボルテージアンプとトランスコンダクタンスアンプの出力は、開発計画当初はサーマルコンバータにフィードバック可能なシステムを構築し、校正された値を出力する予定であった。しかし、研究開発実施過程において、優先度を検討した結果、フィードバックシステムの開発の代用として、ボルテージアンプとトランスコンダクタンスアンプの特性評価を行い、可能な限り、高精度な出力を試みることにした。特性評価による誤差等の補正は、制御プログラムで行なった。

#### (i) ボルテージアンプの誤差評価

複合量任意信号源回路から出力される補正済みの電圧信号は、ボルテージアンプにより電圧が増幅される。このように増幅された電圧に対して高精度な値を保証するためには、予めボルテージアンプの増幅比の誤差を評価する必要がある。ボルテージアンプの増幅比誤差を評価する回路を図3-28に示す。本回路は、ボルテージアンプの増幅比誤差を評価するために、実際の使用条件に合わせた構成となっている。つまり、ボルテージアンプの誤差評価には、入力段に任意信号発生装置を接続し、出力段にはパワーアナライザを接続した状態で、ボルテージアンプの入力信号と出力信号を、パワーアナライザと並列に接続された標準AC電圧測定器を用いて測定した。

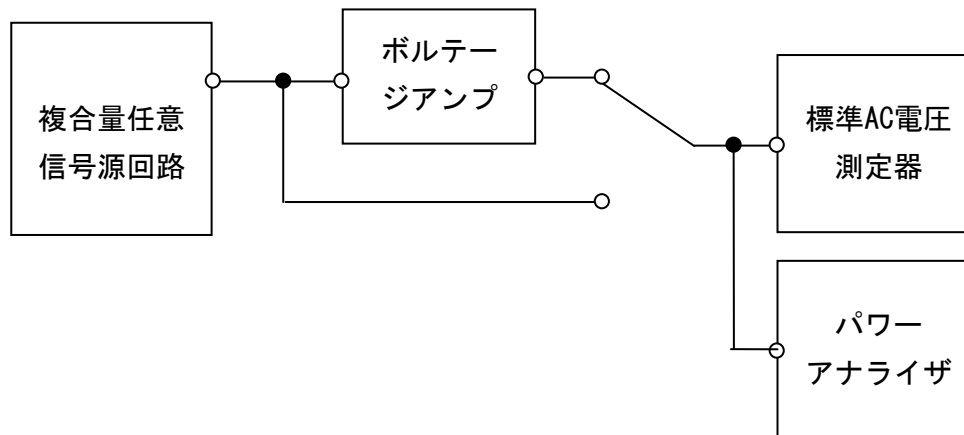


図3-28 ボルテージアンプ誤差評価試験回路

#### (ii) トランスコンダクタンスアンプの誤差評価

複合量任意信号源回路から出力される補正済みの電圧信号は、トランスコンダクタンスアンプにより電流が変換される。上記のボルテージアンプと同様に、変換される電流に対

して高精度な値を保証するために、予めトランスコンダクタンスアンプの変換比の誤差を評価する必要がある。トランスコンダクタンスアンプの変換比誤差を評価する回路を図3-29に示す。本回路は、ボルテージアンプの評価と同様に、実際の使用条件に合わせた構成とするため、入力段に複合量任意信号源回路を接続し、出力段にはパワーアナライザと標準シャントを直列接続した。これによって、トランスコンダクタンスアンプの入力電圧と標準シャントの出力電圧を標準 AC 電圧測定器を用いて測定することで変換比誤差の測定を行った。

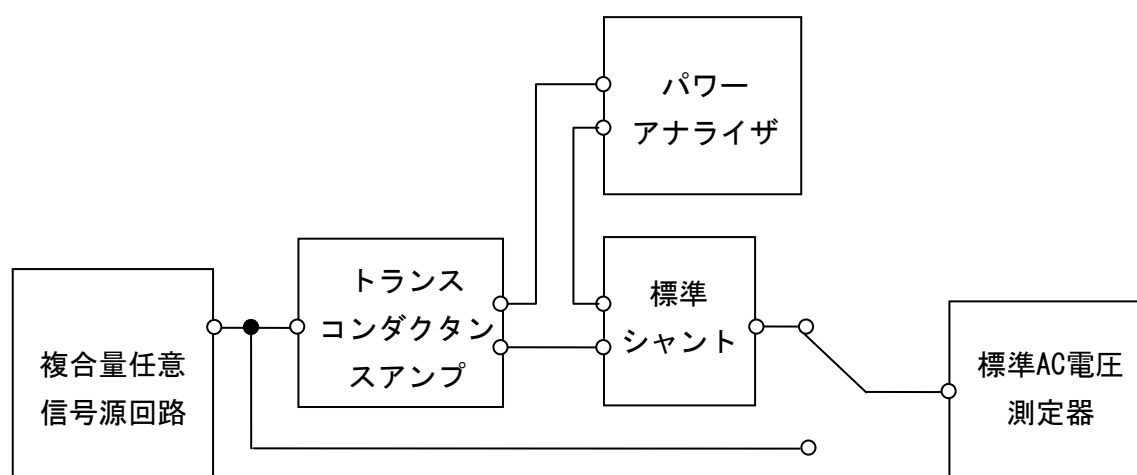


図3-29 トランスコンダクタンスアンプの誤差評価試験回路

上記のボルテージアンプおよびトランスコンダクタンスアンプの誤差評価によって得られた各電圧および各周波数の増幅比誤差および変換比誤差は、複合量電気標準信号発生システムの複合量任意信号源回路で制御プログラムを介して補正処理される。このように、自動補正システムによる振幅値補正、ボルテージアンプおよびトランスコンダクタンスアンプの増幅比および変換比の補正を行って、高精度電圧および高精度電流が出力可能な状態となる。

評価結果は、不確かさを考慮した期間で行い、制御システムに反映させる。図3-30はボルテージアンプおよびトランスコンダクタンスアンプの増幅比および変換比の誤差を補正するための画面であり、予め誤差評価した結果を入力することにより、任意信号発生装置からの出力は各アンプの誤差を考慮した電圧が出力される。

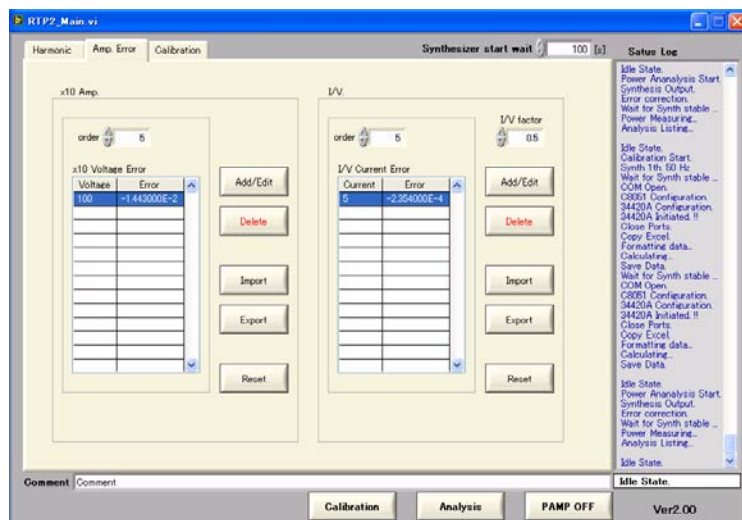


図 3-3 0 ボルテージアンプおよびトランスコンダクタンスアンプのエラー補正設定画面

以上のように、各課題で開発された任意信号発生回路、自動補正システム、薄膜型サーマルコンバータ、小型ジョセフソン電圧標準制御システムを組み合わせ統合化した。構築した複合量電気標準信号発生システムは、電圧範囲は 0 V ～100 V、0 kHz～3 kHz まで任意の値が発生可能で、電流範囲も、0 A～5 A、0 kHz～3 kHz まで任意の値が発生可能である。

### 3-1-3 成果リスト

表 3-6. 学会発表・論文等件数

| 要素技術課題                            | 論文数<br>(査読有り) | 国内会議・<br>学会発表<br>数 | 国際会議・<br>学会発表<br>数 | 特許等件<br>数(出願を<br>含む) | 広報<br>活動 | 受賞実<br>績件数 |
|-----------------------------------|---------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------|------------|
| 1: 薄膜型サ<br>ーマルコン<br>バータの開<br>発    | 8             | 8                  | 5                  | 0                    | 2        | 2          |
| 2: 複合量任<br>意信号源回<br>路の開発          | 1             | 1                  | 3                  | 1                    | 0        | 0          |
| 3: 小型ジョ<br>セフソン電<br>圧標準の開<br>発    | 8             | 7                  | 6                  | 1                    | 0        | 0          |
| 4: 電気標準<br>信号発生シ<br>ステムの開<br>発と評価 | 0             | 1                  | 0                  | 0                    | 2        | 0          |
| 計                                 | 17            | 17                 | 14                 | 2                    | 4        | 2          |

本事業は、標準供給の普及(トレーサビリティの確保)により、製造現場の基盤を支えることを目的とした事業であり、対象とする研究開発は基本的には特許取得を意図するものではない。

表 3-7. 論文、投稿、発表、特許リスト

|           | 題目・メディア等                                                                                                                                                                            | 時期    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 論文<br>査読有 | JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 「Precise measurement of a 20-V programmable Josephson voltage standard system」, 山田隆宏, 山森弘毅, 佐々木仁, 東海林彰, vol. 48, no. 7, 076510 (4pp), Jul. 2009 | H21.7 |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |        |
|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|  | Superconductor Science and Technology 「A direct comparison of a 10-V Josephson voltage standard between a refrigerator-based multi-chip programmable system and a conventional system」, 山田隆宏, 浦野千春, 西中英文, 村山泰, 岩佐章夫, 山森弘毅, 佐々木仁, 東海林彰, 中村安宏, vol. 22, no. 9, 095010 (6pp), Sep. 2009 | H21.9  |
|  | IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 「Single-chip 10-V programmable Josephson voltage standard system based on a refrigerator and its precision evaluation」, 山田隆宏, 浦野千春, 西中英文, 村山泰, 岩佐章夫, 山森弘毅, 佐々木仁, 東海林彰, 中村安宏, vol. 20, no. 1, pp.21-25, Feb. 2010                      | H22.2  |
|  | IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 「Improved fabrication yield for 10V programmable Josephson voltage standard circuit including 524,288 NbN/TiN/NbN Josephson junctions」, 山森 弘毅, 山田 隆宏, 佐々木 仁, 東海林 彰, vol.20, no.2, pp.71-75, Apr.2010                                  | H22.4  |
|  | SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 「Large constant voltage generated with a single array including 65536 Nb/TiN/Nb Josephson junctions」, 山森 弘毅、浦野 千春、丸山 道隆、佐々木 仁、神代 暁, vol.23, no.7, pp.075011_1-075011_5, Jul. 2010                                                                | H22.7  |
|  | IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTAION AND MEASUREMENT 「Evaluation of low-frequency characteristics of a thermal converter using programmable Josephson voltage standard」, 佐々木仁, 山森弘毅, 山田隆宏, 藤木弘之, 東海林彰, 清水目浩司, vol. 59, no. 11, pp. 2930-2935, Nov. 2010                               | H22.11 |
|  | JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 「Preparation of overdamped NbTiN Josephson junctions with bilayered Ti-TiN barriers」, 山森 弘毅, 佐々木 仁, 神代 暁, vol.108, pp.113904_1-113904_5, Dec. 2010                                                                                                        | H22.12 |
|  | IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTAION AND MEASUREMENT 「Uncertainty evaluation of an ac shunt calibration system with a load effect reduction circuit」, 昆盛太郎, 山田達司, vol.7, No.60, pp.2286-2291, Jul. 2011                                                                               | H23.7  |
|  | IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTAION AND MEASUREMENT 「Development of thin-film multijunction thermal converters with a novel structure」, 藤木弘之, vol.7, No.60, pp.2725-2729,                                                                                                            | H23.7  |

|    |                                                                                                                                                                                                                                            |         |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
|    | Jul. 2011                                                                                                                                                                                                                                  |         |
|    | IEICE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS 「NbN-based overdamped Josephson junctions for quantum voltage standards」, 山森 弘毅、山田 隆宏、佐々木 仁、神代 暁, vol. E95-C, no. 3, pp. 329-336, Mar. 2012                                                              | H24. 3  |
|    | IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTAION AND MEASUREMENT 「Improved measurement of ac-dc transfer difference using a low-drift single-junction thermal converter」, 天谷康孝, 中村安宏, vol. 61, no. 3, pp. 786-790, Mar. 2012                            | H24. 3  |
|    | IEEJ TRANSACTIONS ON FUNDAMENTALS AND MATERIALS 「Development of low-frequency ac voltage measurement system using single-junction thermal converter」, 天谷康孝, 中村安宏, vol. 132, no. 3, pp. 214-219, Mar. 2012                                  | H24. 3  |
|    | IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING 「Numerical analysis of low-frequency properties in single-junction thermal converters」, 天谷康孝, 中村安宏, vol. 7, no. 4, pp. 350-354, Jul. 2012                                       | H24. 7  |
|    | 電気学会論文誌 A 「薄膜型サーマルコンバータの安定性の改善」, 天谷康孝, 藤木弘之, 清水目浩司, 日高滋, vol. 132, no. 11, pp. 1011-1017, Nov. 2012                                                                                                                                        | H24. 11 |
|    | IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING 「Multijunction thermal converter with improved frequency characteristics between 10 Hz to 1 MHz」, 日高滋, 岸野要, 清水目浩司, 武田進, 藤木弘之, 天谷康孝, 佐々木仁, vol. 8, no. 1, pp. 101-104, Jan. 2013 | H25. 1  |
|    | IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTAION AND MEASUREMENT 「Development of thin-film multijunction thermal current converters with increased rated current」, 藤木弘之, vol. 62, no. 6, Jun. 2013 出版予定                                                 | H25. 6  |
|    | IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTAION AND MEASUREMENT 「Low-frequency characterization in a thermal converter using programmable Josephson voltage standard system」, 天谷康孝, 丸山道隆, 藤木弘之, vol. 62, no. 6, Jun. 2013 出版予定                         | H25. 6  |
| 発表 | 国際会議 ISEC2009 「Improved fabrication yield for 10V programmable Josephson voltage standard.」                                                                                                                                                | H21. 6  |
|    | 国際会議 ISEC2009 「Current margins of digital to analog                                                                                                                                                                                        | H21. 6  |

|  |                                                                                                                  |        |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
|  | converter using meander Josephson junction arrays for quantum voltage standards」                                 |        |
|  | 国際会議 ISEC2009 「Development of a reliable cryopackaging technique for Josephson voltage standards」                | H21.6  |
|  | 第 70 回応用物理学会学術講演会「量子交流電圧標準用 Nb/TiN/Nb ジョセフソン接合アレーの作製」                                                            | H21.8  |
|  | 第 57 回応用物理学関係連合講演会「NbN/TiN/NbN 接合を用いたジョセフソン電圧標準回路の 12K 動作」                                                       | H22.3  |
|  | 2010 年電子情報通信学会総合大会「プログラマブルジョセフソン電圧標準素子の冷凍機実装技術」                                                                  | H22.3  |
|  | 平成 22 年度電気学会全国大会「薄膜型サーマルコンバータの周波数解析」                                                                             | H22.3  |
|  | 国際会議 CPEM2010 「12 K operation of 2 V Josephson voltage standard circuit using NbN/TiN/NbN junctions」             | H22.6  |
|  | 国際会議 CPEM2010 digest 「Development of a compact voltage standard based on NbN/TiN/NbN array operating at 10 K」    | H22.6  |
|  | 国際会議 CPEM2010 「Frequency characteristics of calculable thin-film multijunction thermal converters above 1 MHz」   | H22.6  |
|  | 国際会議 CPEM2010 「Calibration-free arbitrary power calibrator with self-calibration by ac-dc measurement technique」 | H22.6  |
|  | 国際会議 CPEM2010 「Verification and uncertainty evaluation of an ac shunt calibration system at power frequencies」   | H22.6  |
|  | 国際会議 CPEM2010 「An analysis of low frequency properties in a thermal converter」                                   | H22.6  |
|  | 第 71 回応用物理学会学術講演会「Nb/TiN/Nb 接合アレーの自己発振フェーズロックによる高出力電圧化」                                                          | H22.9  |
|  | 第 58 回 応用物理学関係連合講演会「NbTiN/Ti-TiN/NbTiN 接合を用いた電圧標準用 DA 変換器の作製」                                                    | H23.3  |
|  | 平成 23 年度電気学会全国大会「薄膜型サーマルコンバータの安定性の改善と低周波特性の評価」                                                                   | H23.3  |
|  | 平成 23 年度電気学会基礎・材料共通部門大会「サーマルコンバータを用いた低周波交流電圧測定システムの開発」                                                           | H23.9  |
|  | 日本学術振興会シンポジウム「Rack-Mount-Type Josephson Voltage Standard Based on NbN/TiN/NbN Array Operating at 12 K」           | H23.10 |

|      |                                                                                                                                           |              |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
|      | 国際会議 APMP Technical Committee on Electricity and Magnetism (TCM) 「Programmable Josephson voltage standard for industry developed at AIST」 | H23.12       |
|      | 平成 24 年度電気学会全国大会「交流電流用薄膜型サーマルコンバータの開発」                                                                                                    | H24.3        |
|      | 平成 24 年度電気学会全国大会「電気標準を利用した精密トランスコンダクタンスアンプの評価法」                                                                                           | H24.3        |
|      | 平成 24 年度電気学会全国大会「薄膜型サーマルコンバータの耐環境性の評価」                                                                                                    | H24.3        |
|      | 国際会議 CPEM2012 「Thin-film multijunction thermal current converter with increased rated current level」                                      | H24.7        |
|      | 国際会議 CPEM2012 「Uncertainty estimations of an evaluation system for a high accuracy and wideband transconductance amplifier」               | H24.7        |
|      | 国際会議 CPEM2012 「Sampling measurement using a programmable Josephson voltage standard system toward low-frequency ac voltage standard」      | H24.7        |
|      | 国際会議 CPEM2012 「Numerical and experimental investigations of low-frequency properties of single-junction thermal converter」                | H24.7        |
|      | 第 73 回応用物理学会学術講演会「ジョセフソン交流電圧標準装置を用いたサーマルコンバータの低周波特性評価システムの開発」                                                                             | H24.9        |
|      | 2012 年電子情報通信学会ソサイエティ大会「プログラマブルジョセフソン交流電圧装置を用いた薄膜型サーマルコンバータの低周波特性の評価」                                                                      | H24.9        |
|      | NMIJ 国際計量標準シンポジウム「NMIJ における計量標準整備戦略」                                                                                                      | H24.10       |
|      | 平成 25 年度電気学会全国大会「交流電流交直変換標準の電流範囲の拡張」                                                                                                      | H25.3        |
|      | 平成 25 年度電気学会全国大会「真空中動作による薄膜型サーマルコンバータの低周波特性の改善」                                                                                           | H25.3        |
| 特許   | 特願 2010-079988 高精度任意波形信号発生装置                                                                                                              | H22.3        |
|      | 特願 2011-168231 ジョセフソン接合アレー構造体、該構造体を用いたデジタルアナログ変換器及び超伝導電圧標準回路                                                                              | H23.8<br>審査中 |
| 広報活動 | 2011 年産総研オープンラボ「交流電圧標準を導くサーマルコンバータ素子の開発」                                                                                                  | H23.10       |

|    |                                                                                                                                     |         |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
|    | 2012 年産総研オープンラボ「電気複合量リアルタイム・キャリブレーション装置の開発」                                                                                         | H24. 10 |
|    | N M I J 2012 年度成果発表会「電気複合量発生装置の開発」                                                                                                  | H25. 1  |
|    | N M I J 2012 年度成果発表会「プログラマブルジョセフソン交流電圧発生器を用いたサーマルコンバータの低周波特性評価技術の開発」                                                                | H25. 1  |
| 受賞 | 国際会議 CPEM2012 若手キャリア賞「Numerical and experimental investigations of low-frequency properties of a single-junction thermal converter」 | H24. 7  |
|    | 平成 24 年電気学会全国大会優秀論文発表賞「薄膜型サーマルコンバータの耐環境性の評価」                                                                                        | H25. 3  |

### 3-2 目標の達成度

3-1-2 節で述べた個別要素技術の成果を表 3-8 でまとめる。

表 3-8. 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 |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 課題 1：薄膜型サーマルコンバータの開発 | 従来のサーマルコンバータは豆電球型の 3 次元構造で、過電流に弱い。産業現場で用いることから、過電流に強い壊れにくい構造が望まれるため、従来の 2 倍の定格電流でも壊れない構造にする。微細加工技術を利用し、薄膜型へと小型化する。形状は 3 cm × 3 cm 以内を目指す。 | 薄膜型サーマルコンバータ素子の形状は 1.5 cm × 1 cm を達成した。また、ヒータ抵抗 700 Ω の定格電流は 20 mA で通常のサーマルコンバータの 2 倍の電流を印加可能である。 | 達成  |
|                      | サーマルコンバータの交直差の特性を改善する。標準として利用できるよう、ヒータ抵抗の温度係数は 10 ppm                                                                                     | ヒータ抵抗の温度係数はヒータ膜作製のアニールの条件を詳しく調べ、10 ppm/°C 以内を実現し                                                  | 達成  |

|                        |                                                                                                       |                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 課題 1 : 薄膜型サーマルコンバータの開発 | ／℃以下に抑え、熱的時定数を最適化することで、低周波特性を 10 ppm 以内に改善する。                                                         | た。この結果、交直差の低周波特性は 10 ppm 以内に改善した。                                                                                                                                              |    |
|                        | サーマルコンバータを薄膜化することにより、作製の歩留まりが悪く、製品化の支障になる可能性がある。歩留まりを 9 割以上に向上する作製方法を開発する。                            | 本プロジェクトで開発したサーマルコンバータは、熱電対薄膜とヒータ薄膜を別々の基板で独立に作製している。ヒータ基板を熱電対基板に取り付ける作業が歩留まりの原因である。このため、薄膜作製のホルダーを作製し、熱電対膜作製の改善を行い、歩留まりを 9 割以上に改善することに成功した。                                     | 達成 |
|                        | サーマルコンバータの劣化防止を行う。サーマルコンバータのヒータの発熱による使用中の材質の劣化が予想される。10 年間にわたり使用可能で経年変化が 3 ppm 以下のサーマルコンバータの素子の開発を行う。 | サーマルコンバータの劣化の原因を調査する実験の結果、熱電対膜の劣化が顕著であることを特定した。高温対策の膜の構造に成功し、熱電対の高温環境での劣化防止対策を実現した。温度加速による寿命予測モデルを適用して、通常の使用において、10 年以上使用可能な素子を開発した。また、交直差の経年変化も定期的な校正から、1 ppm/年の経年変化の結果を得ている。 | 達成 |
| 課題 2 : 複合量任意信号源回路の開発   | サーマルコンバータを利用した高精度任意信号発生装置の開発を行う。任意発生器                                                                 | 任意信号発生装置においては、直流信号と交流信号の切り替え器であるマ                                                                                                                                              | 達成 |

|                        |                                                     |                                                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 課題 2 : 複合量任意信号源回路の開発   | でサーマルコンバータの交流差を参照として、出力は 1 V~10 V の電圧を発生できる装置を開発する。 | ルチプレクサ、電流容量を確保するバッファアンプ、信号の振幅を比較、補正するエラー解析装置、シンセサイザを開発した。交流電圧は、サーマルコンバータを参照して、ジョセフソン電圧とシンセサイザの実効値を比較し、交流信号の振幅を校正して、1 V~10 V の基準信号を出力することに成功した。                                                   |    |
|                        | 5 kHz 以下での交流電圧の不確かさが 30 ppm 以内の任意信号発生装置を開発する。       | スイッチング制御、及び、サーマルコンバータの出力信号のサンプリング制御するシステムの開発を行った。これにより、精度の向上をはかった。交流電圧の不確かさ評価を行い、1 kHz で、不確かさ 8 ppm を実現した。                                                                                       | 達成 |
| 課題 3 : 小型ジョセフソン電圧標準の開発 | 12 K 程度の温度で動作可能なジョセフソン素子を設計、作製する。                   | ジョセフソン素子の設計と動作確認を行い、以下の結果を得た。(1) ストレスの小さい多結晶 NbTiN 薄膜において、超伝導転移温度 $T_c=14.7$ K、抵抗率 $103.5 \mu \Omega \text{ cm}$ の値を得る条件を見出した。(2) この薄膜と Ti-TiN 常伝導層を用いてジョセフソン接合を提案し、32768 個のジョセフソン接合を含む電圧標準用アレーに | 達成 |

|                                    |                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 課題 3 : 小型<br>ジョセフソン<br>電圧標準の開<br>発 |                                                                                                                                                                                                                            | <p>において 1 V のシャピロス<br/>テップを 0.5 mA の電流幅<br/>で得ることに成功した。<br/>(3) NbTiN 薄膜は、電圧<br/>標準用の材料としても小<br/>さい抵抗率、高い <math>T_c</math> をも<br/>ち、直流電圧標準として<br/>使用可能なことを示すこ<br/>とができた。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|                                    | <p>ジョセフソン装置のシステ<br/>ム制御回路の小型化を行う。<br/>要素回路（温度制御回路、バ<br/>イアス回路、マイクロ波回<br/>路、電圧増倍回路）を開発す<br/>る。コンプレッサー以外の全<br/>ての要素部品を、19 インチ<br/>の計測ラックに搭載可能な、<br/>標準規格の筐体（幅 450 mm<br/>高さ 270 mm 奥行き 500 mm<br/>程度）に収納することを目<br/>標とする。</p> | <p>温度制御回路について<br/>は、6 つのメイン回路部<br/>（(1) ロジック回路用電<br/>源回路、(2) アナログ回<br/>路用電源回路、(3) 電源<br/>周波数検出回路、(4) 温<br/>度測定用 ADC 回路、(5)<br/>温度測定・ヒーターレベ<br/>ル設定用 DAC 回路、(6)<br/>ヒーター電流出力回路）<br/>を独自に開発した。バイ<br/>アス回路は、従来の直流<br/>電圧標準用システムのバ<br/>イアス回路を見直し、出<br/>力チャネル数などを削減<br/>することによって、小型<br/>化を実現した。マイクロ<br/>波回路については、従来<br/>のシステムのパッケージ<br/>ングを工夫することによ<br/>り、コンパクト化を行な<br/>った。電圧増倍回路は今<br/>回新たに開発し、10 個の<br/>独立した DAC を用いて作<br/>製した。以上の取り組み<br/>により、容積比で約 30%<br/>のコンパクト化を達成</p> | 達成 |

|                                    |                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 課題 3 : 小型<br>ジョセフソン<br>電圧標準の開<br>発 |                                                                                                                               | し、19 インチの計測ラックに搭載可能なシステム制御回路を開発した。                                                                                                                                                                                                                    |    |
|                                    | 液体 He フリーの小型冷凍機を用いたクライオスタットを開発する。1mK 以下の温度安定性と 10 K まで冷却が可能なクライオスタットを製作する。                                                    | 極低温冷凍機で発生する周期的温度振動(ステージ部分では 10 mK 以上の温度変動を発生)を抑えるため、10 K においても比較的大きな比熱を有している鉛のブロックをコールドヘッドに付加して、温度変動を軽減した。動作試験において、10 mK 以下の温度安定性を確認した。                                                                                                               | 達成 |
|                                    | 開発したジョセフソン素子、システム制御回路、クライオスタットを用いて、ジョセフソン電圧発生装置を完成させる。正常動作の確認を行う自動制御プログラムを開発することにより、1V で、0.5 ppm 以下で直流電圧の校正が可能な能力を持つことを目標とする。 | 任意の直流電圧を自動制御で発生させるため、RF モジュール、TEMP モジュール、BIAS モジュール、RF モジュール、VMx10 モジュールを USB インターフェイスで制御可能なシステムを開発した。トラップ除去や動作温度、及び、RF パワーの最適化、バイアス電流の動作点の最適化も自動制御可能とした。DAC 出力電圧をジョセフソン電圧と再度比較、補正することにより、校正された出力電圧の発生が可能である。これらにより、0.5 ppm 以下で、直流電圧の校正が可能なシステムを開発した。 | 達成 |

|                           |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                        |    |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 課題 4 : 電気標準信号発生システムの開発と評価 | 課題 2 の任意信号発生装置の出力範囲は 10 V までである。100 V までの出力が可能なアンプの開発をする。アンプの特性評価を行い、100 V、50 Hz で長期安定度 100 ppm 以下の電圧増幅器を開発する。                                      | 交流電圧発生器の技術を用いて、長期に安定な増幅率 10 倍の電圧増幅器の設計・開発及び製作と評価を行った。短期安定度、温度依存、長期安定度の評価をから、短期安定は±10 ppm、温度特性は 3 ppm/°C、長期安定度は 65 ppm を実現した。                                           | 達成 |
|                           | 課題 2 の任意信号発生装置を用いて、5 A まで電流が発生可能なトランスコンダクタンスアンプを開発する。5 A、50 Hz で長期安定度 100 ppm 以下の電圧－電流変換器を開発する。                                                     | 交流電流発生器の技術を用いて、長期に安定な電圧－電流変換の設計・開発及び製作と評価を行った。短期安定度、温度依存、長期安定度の評価を行なった。短期安定は±20 ppm、温度特性は 7 ppm/°C、長期安定度は 55 ppm を実現した。                                                | 達成 |
|                           | 課題 1～3 のシステムを統合し、産業現場で、直流電圧と交流電圧が校正可能な装置を開発する。電流と電圧は同時に発生可能として、複数電気量の校正が可能なシステムとする。周波数 0～3 kHz、電圧 0 V～100 V、電流 0 A～5 A においてそれぞれ校正された任意の出力値が発生可能とする。 | 開発した任意信号発生回路、自動補正システム、薄膜型サーマルコンバータ、小型ジョセフソン電圧標準制御システムを統合化した。統合制御プログラムを開発し、複合量電気標準信号発生システムの安定度評価を行い、高精度な電圧・電流（50 Hz で 100 ppm 以下の安定度）の同時出力を実現した。出力範囲は、計画通りに、電圧範囲は 100 V | 達成 |

|                                       |  |                                                    |  |
|---------------------------------------|--|----------------------------------------------------|--|
| 課題 4 : 電気<br>標準信号発生<br>システムの開<br>発と評価 |  | 以下、0 ～3 kHz、電流範<br>囲は、5 A 以下、0～3 kHz<br>の出力が可能である。 |  |
|---------------------------------------|--|----------------------------------------------------|--|

## 4. 事業化、波及効果

### 4-1 事業化の見通し

#### 1) 成果の利用主体

リアルタイム・キャリブレーション技術の事業化については、装置全体の製品化、及び個別要素の事業化を計画している。

リアルタイム・キャリブレーション装置の利用主体は、電子計測器の検査やトレーサビリティを必要とする製造メーカーや JCSS 校正を行っている校正事業者である。

個別要素であるサーマルコンバータについても製品化を行なう。利用主体は、校正事業者と各国の標準機関と計測メーカーである。交流電圧の基準となるサーマルコンバータのうち、高精度のものについては、本研究開発事業で開発したサーマルコンバータのみが国内外で唯一供給可能な状態になっており、海外からの問い合わせも多い。

個別要素である小型ジョセフソン装置についても、製品化を予定している。利用主体は、校正事業者と各国の標準機関と計測器メーカーである。開発した小型ジョセフソン装置は 1.1111 V など任意の電圧が発生可能である。メーカーの製品の指示値は電圧出力の場合がほとんどであるため、複数点の信頼性のある値を必要とする製品の性能評価にも利用できると予想される。

#### 2) 事業化に至る期間

個別要素のサーマルコンバータについて、現在、温度、気圧などを変えた環境テストを行なっている最中である。環境テストを反映させた改善を 2014 年度までに完了する予定である。不具合が見つからない場合、2015 年度までには製品化の予定である。

小型ジョセフソン装置については、装置単体で、直流電圧の校正が可能なシステムを開発する必要がある。2013 年度はツェナー電圧発生装置の校正システムを構築する。2014 年度～2016 年度に実地試験と操作性の改善を行い、2017 年度に装置の完成を計画している。

リアルタイム・キャリブレーション装置については、アンプのフィードバックシステムを実装していないため、校正装置として使用する場合、経年変化、安定度の評価が必要となる。また、いくつかの代表的な被校正装置に対して、不確かさの評価を計画している。2013 年度～2014 年度はアンプの評価法を校正事業者が独自で行なえるようにシステムの開発を行なう。2015 年度～2016 年度に代表的な被校正装置を校正する場合の不確かさ評価を行なう。2017 年度～2019 年度に実地試験を行い、2020 年に実地試験を反映した改善を行い、製品化を行なうことを予定している。

また、リアルタイム・キャリブレーション装置の工業標準化についても検討する。

### 3) 問題点の分析と明確な解決方策

薄膜型サーマルコンバータの製品化においては、ヒータ抵抗の変更や環境条件の再確認を行なう必要がある。ヒータ抵抗の変更により、発熱量などが変わるため、劣化状況や、周波数特性の確認の必要がある。現在、恒温槽などを用いて、温度、気圧などの条件を変えた環境で、周波数特性の評価を行なっている。

小型ジョセフソン装置については、装置の普及のため、装置単体で、直流電圧を校正できるプログラムの作成が必要である。解決のため、現在、ツェナー電圧発生装置を自動校正するプログラムを作成している。直流電圧標準で一般的に用いられているツェナー電圧発生装置の不確かさ評価も同時に行なう予定である。

リアルタイム・キャリブレーション装置においては、アンプの評価が問題である。アンプの出力を任意信号発生装置へフィードバックするシステムの開発は時間とコストの負担が大きいため、現在、2通りの解決策を考えている。解決策の一つとして、アンプをリアルタイム・キャリブレーション装置から切り離して、アンプの出力を自動校正できるシステムの検討を行っている。もう一つの解決策として、開発したアンプを用いずに、市販のアンプをリアルタイム・キャリブレーション装置に組み込むことも検討している。この場合、ユーザーがすでに管理している特性の既知なアンプを利用することで、ユーザーが希望する範囲の出力を得ることが可能となる。

## 4-2 波及効果

リアルタイム・キャリブレーション技術を、将来的に、電力標準や波形標準を含めた複数の電気標準を一括して校正可能なシステムに応用することが可能である。産業現場で国家標準へのトレーサビリティが確保できるシステムを構築することにより、校正証明書をタイムラグなしに発行することも期待される。複合量で、かつ、離散的でない任意の値の校正システムは、製品の包括的な性能評価を容易にすることに貢献する。

以上のような特徴から、以下の波及効果が期待される。

#### ・複合量電気標準信号発生システムの製品化

複数の電気標準器の機能を1台でカバー可能な特徴を持つ装置の製品化である。国内だけでなく、海外のマーケットもターゲットとすることが可能である。

#### ・電気計測機器産業全体での経済波及効果

本装置の導入により、産業現場で高精度の自動校正が実現されると、生産性を飛躍的に向上することが期待できる。設備費削減、生産ロスの削減などの業務効率化、信頼性向上による競争力強化が期待できる。

- ・ **校正費用の削減効果**

本装置を用いることにより、人件費や校正に係わる機器管理費、その他の維持費の削減が見込まれる。このことにより、校正に係わる費用の削減が期待できる。

- ・ **スマートメータへの波及効果**

スマートメータは従来の電力メータよりも測定精度が高く、製造検査工程での厳しい検査が予想される。本装置を電気量の検査に適用することで、スマートメータの高精度化への貢献が期待される。

## 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

リアルタイム・キャリブレーション技術の開発においては、4つの要素課題、①薄膜型サーマルコンバータの開発、②複合量任意信号源回路の開発、③小型ジョセフソン電圧標準の開発、④電気標準信号発生システムの開発と評価を平行に推進した。相互に連携することにより、関連する技術の問題を改善し、全体が最適化されるよう開発を行なった。

表5-1. は実施した研究開発計画である。

表5-1. 研究開発計画

| 実施項目・体制／年度         |           | 平成21年度                                                                         | 平成22年度 | 平成23年度 |
|--------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|
| 薄膜型サーマルコンバータの開発    | ニッコー株式会社  | <b>インtrinsic標準の開発</b><br>加速試験法の確立 → 劣化防止素子試作<br>素子設計と評価 → 測定精度の向上 → 耐久性能実証     |        |        |
|                    | 産業技術総合研究所 |                                                                                |        |        |
| 複合量任意信号源回路の開発      | 産業技術総合研究所 | 任意信号発生源の自動補正回路の製作<br>DA変換器の評価 → FPGA回路等製作 → 任意信号源の開発<br><b>基準信号発生装置の開発</b>     |        |        |
|                    | 株式会社SRT   |                                                                                |        |        |
| 小型ジョセフソン電圧標準の開発    | 産業技術総合研究所 | 12K動作NbNジョセフソン素子の開発<br>制御回路の製作 → クライオスタット製作 → システム小型化<br><b>インtrinsic標準の開発</b> |        |        |
|                    |           |                                                                                |        |        |
| 電気標準信号発生システムの開発と評価 | 横河電機株式会社  | I-V変換回路・電圧増幅器の設計・動作解析 → 動作実証<br><b>アンプの開発</b>                                  |        |        |
|                    | 産業技術総合研究所 |                                                                                |        |        |
|                    |           | 統合・システム化                                                                       |        |        |

## 5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本事業は、経済産業省産業技術環境局知的基盤課の公募による選定審査手続きを経て、産業技術総合研究所（以下、産総研）が委託研究を受けて実施した。また、再委託先として、横河電機株式会社、ニッコー株式会社、株式会社S R Tが参加した。実施体制を図5-1に示す。

研究開発の実施にあたっては、研究開発を統括するためのプロジェクトリーダー（中村 安弘 産総研 計測標準研究部門主幹研究員）のもとで、各テーマにサブリーダーを設置するとともに、産総研内に再委託先の公募や委託先の選定、及び、テーマ間の連携やプロジェクトの進捗管理を行うための事務局（以下、リアルタイム事務局）を設置した。再委託先においても、プロジェクトチームを立ち上げ、再委託先の代表者を選定することで、事業の効率的な運営がなされる体制を構築した。本事業の実施にあたっては、プロジェクトリーダーとリアルタイム事務局が年度計画、中間報告、年度報告の全体会議を計画・運営した。また、事務局と連携して、テーマ間の連絡会を適宜開催した。一例として、課題1の薄膜型サーマルコンバータ開発において、出力インピーダンスを適切に決定するため、課題1の担当者は課題2の任意信号発生器の設計、仕様に関与した。また、再委託先との連携においても、課題1のサーマルコンバータ劣化対策では、産総研の評価をフィードバックして、再委託先の作製方法の改善に寄与した。

各テーマのプロジェクトチームに関しては、表5-2の通り、研究開発、事業化を推進できる資質を備えている。

成果の広報活動においては、電気学会、標準関連の国際会議、論文発表を通して、積極的に行なっている。加えて、産総研が主催している、NMIJ 計測クラブでのアナウンスや、オープンラボ、NMIJ 成果発表会で講演などを行っている。今後も、計測関連の展示会やフォーラムなどで、広報活動を行なう予定である。

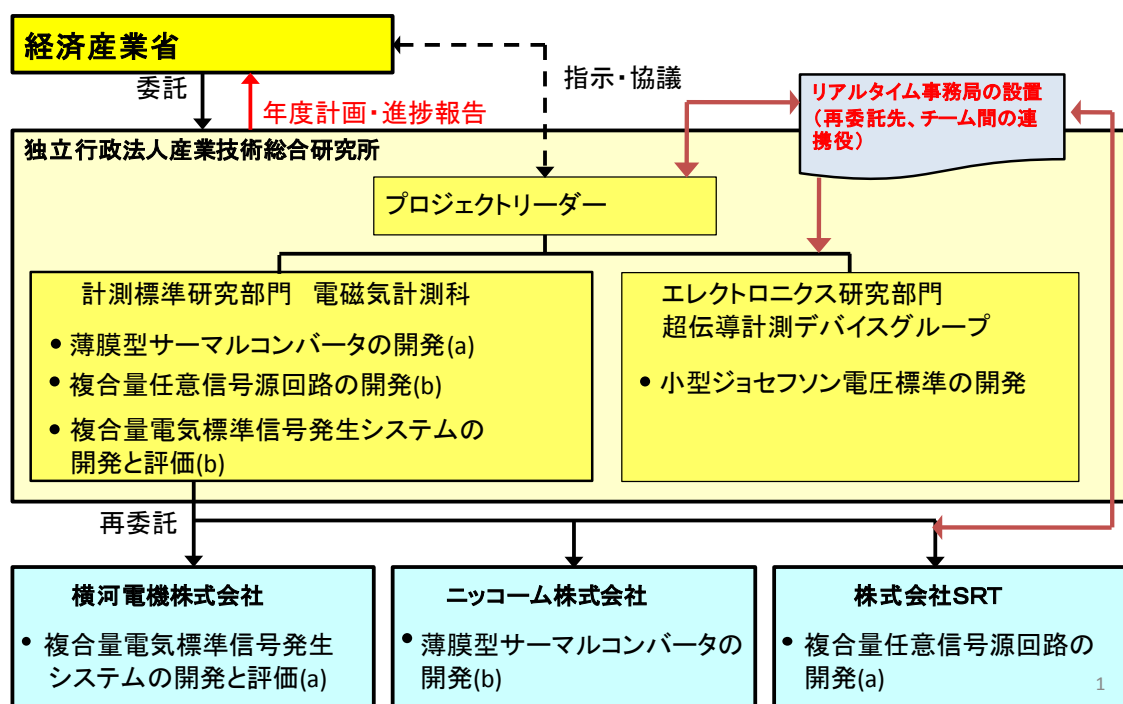


図5-1. リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発の実施体制

表5-2. プロジェクトチームの資質

| 課 題                 | 所属・役職                           | 主な研究経歴又は実績                                          |
|---------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 薄膜型サーマルコンバータの開発 (a) | 産業技術総合研究所<br>計測標準研究部門<br>電磁気計測科 | 交直変換標準、サーマルコンバータに関する研究、交流電圧標準に関する研究                 |
| 薄膜型サーマルコンバータの開発 (b) | 再委託先<br>ニッコム株式会社                | 赤外線センサをはじめ、薄膜精密抵抗器等の薄膜応用電子部品を、長年にわたり製造              |
| 複合量任意信号源回路の開発 (a)   | 産業技術総合研究所<br>計測標準研究部門<br>電磁気計測科 | アナログ・デジタル回路設計、誘導分圧器標準に関する研究                         |
| 複合量任意信号源回路の開発 (b)   | 再委託先<br>株式会社 SRT                | DDS、ADC、FPGA等を搭載した電子機器の設計製造、高度な電子回路設計技術および品質評価技術を保有 |
| 小型ジョセフソン電圧標準の開      | 産業技術総合研究所<br>エレクトロニクス研究部        | 超伝導集積回路、ジョセフソン電圧標準素子に関する                            |

|                       |                                 |                                       |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 発                     | 門超伝導計測デバイスグループ                  | 研究                                    |
| 電気標準信号発生システムの開発と評価(a) | 再委託先<br>横河電機株式会社                | 電圧計、電圧発生装置、電力計を長年に渡り製造販売、蓄積された計測技術を保有 |
| 電気標準信号発生システムの開発と評価(b) | 産業技術総合研究所<br>計測標準研究部門<br>電磁気計測科 | 高調波電圧電流標準、変流器標準、交流シャント標準に関する研究        |

### 5-3 資金配分

研究予算は実施前に各研究課題のチームに事前にヒアリングを行い、資金の見積を行なっている。経済産業省からの委託金については、前年度中に支出計画書を提出し、計画書に基づき各研究テーマに研究予算を配分した。年度途中の中間検査および年度末の確定検査を経て費用を確定した。

表 5-3. 資金配分 (単位：千円)

| 研究課題 / 年度          |            | 2 1    | 2 2    | 2 3    | 合計      |
|--------------------|------------|--------|--------|--------|---------|
| 薄膜型サーマルコンバータの開発    | 産業技術総合研究所  | 13,143 | 12,908 | 9,392  | 35,442  |
|                    | ニッコーム株式会社  | 9,192  | 9,000  | 5,118  | 23,309  |
| 複合量任意信号源回路の開発      | 産業技術総合研究所  | 27,688 | 23,690 | 0      | 51,377  |
|                    | 株式会社 S R T | 10,000 | 8,999  | 5,150  | 24,148  |
| 小型ジョセフソン電圧標準の開発    | 産業技術総合研究所  | 12,194 | 10,921 | 8,433  | 31,548  |
| 電気標準信号発生システムの開発と評価 | 横河電機株式会社   | 16,416 | 19,296 | 9,594  | 45,306  |
|                    | 産業技術総合研究所  | 0      | 0      | 11,026 | 11,026  |
| 合計                 |            | 88,633 | 84,814 | 48,713 | 222,160 |

## 5-4 費用対効果

### (1) 複合量電気標準信号発生システムの市場効果

本事業の成果を国内の電気機器メーカーが実用化した場合、装置単価は 5 千万円／台と想定される。

2020 年までに国内外の電気校正事業者やメーカーへ 100 台/年程度の段階的な普及を見込むと、少なくとも  $0.5 \text{ 億円} \times 100 \text{ 台} \times 5 \text{ 年} = 250 \text{ 億円}$  の市場効果と想定される。

### (2) 電気計測機器産業全体での経済波及効果

積層セラミックコンデンサ製造業を、我国を代表する典型的な標準品事業のため経済波及効果の算出例として考える。セラミックコンデンサの生産では、検査機器の校正で輸送も含めて発生する 1 週間程度（年間稼働率の約 1%）の無稼働時間を損失時間として計上すると、ある大手メーカーでは 1 億円/年の潜在的な損失金額が推定される。2020 年までに 100 台が段階的に普及した場合、 $1 \text{ 億円/年} \times 100 \text{ 台} \times 5 \times 1/2 = 250 \text{ 億円}$  の生産性向上が期待できる。大手 2 社では  $250 \text{ 億円} \times 2 \text{ 社} = 500 \text{ 億円}$  の経済効果が期待できる。

不良判別工程での測定精度の低さによる潜在的な損失は 1 千円/年と推定されている。2020 年までに 100 台が段階的に普及した場合、 $1 \text{ 千円/年} \times 100 \text{ 台} \times 5 \times 1/2 = 25 \text{ 億円}$  の生産率向上が期待できる。大手 2 社では  $25 \text{ 億円} \times 2 \text{ 社} = 50 \text{ 億円}$  の経済効果が期待できる。

2012 年度の積層セラミックコンデンサの市場規模は約 6000 億円（法人企業統計）、電気計測機器産業は約 1 兆 390 億円<sup>1)</sup> の市場規模である。また、電子部品産業は 15 兆円（法人企業統計）の市場規模が試算されている。同等の波及効果が期待できると考え、②で試算した効果(0.6 億)から電気・電子産業（16 兆円）の効果を推定すると、 $550 \text{ 億円} \times (16 / 0.6)$ （係数）=1 兆 3300 億円となる。

### (3) 校正費用の削減効果

本装置の普及に伴い、産業現場での試験報告書、計算成績書の 5 万件にも貢献が期待できる。1 件あたりの平均的な単価 10 万円の校正費用を本装置で代用できるとすると、2020 年までに、 $10 \text{ 万円/件} \times 5 \text{ 万件/年} \times 5 \text{ 年} = 250 \text{ 億円}$  の校正費用削減効果が期待される。

### (4) スマートメータへの波及効果

スマートメータは従来の電力メータよりも測定精度が高く、製造検査工程での管理基準を厳しくする必要があり、本事業の成果が適用できると考えられる。

設備費の削減、高精度化による歩留まりや検査効率の向上、信頼性向上による競争力強化により、年 5 %/年程度の生産性の向上を想定する。これが、スマートメータ市場（市場規模：2020 年において 1 兆円以上）の拡大に寄与すると仮定すると、 $1 \text{ 兆円} \times 5 \% = 500 \text{ 億円}$  の経済効果が期待される。

## **5－5 変化への対応**

本事業は平成21年度から平成25年度まで行う計画であったところ、以下の見直しを行い、事業の効率化を図った結果、研究開発期間を2年短縮した。

### **(1) アンプのフィードバック**

事業の当初は、アンプの出力を基準信号発生装置にフィードバックし、基準信号と比較校正を行い、アンプからも校正された出力を発生する計画を予定していた。一方、産業現場で用いる校正装置の開発であることから、校正事業者と同等の小さい不確かさは必要ないと考え、アンプのフィードバックは行わず、アンプの特性評価に計画を変更した。一方、リアルタイム・キャリブレーション技術の中核をなすイントリンシック標準を用いた基準信号の発生は重要と考え、ジョセフソン電圧発生装置の出力と任意信号発生装置の出力は独立に取り出し可能なシステムに仕様を変更した。このことにより、必要な場合は高精度の信号の利用も可能とした。

### **(2) 電力の校正システム**

本事業は電力の校正システムを構築する計画であったが、開発したリアルタイム・キャリブレーション装置は交流電圧と交流電流の発生が同時に可能であり、電力の校正は各利用主体で行うことが可能であることから、優先度を考慮して研究開発課題としないこととし、開発期間を短縮した。

上記の変更に加えて、ユーザーの要望を反映して、以下の変更を行なった。

### **(3) リアルタイム・キャリブレーション装置の仕様変更**

ユーザーの聞き取り調査の結果、装置の低価格化や、産業現場での装置利用の負担軽減の観点から、市販のツェナー電圧標準やアンプを利用したシステムの構築の要望があった。そこで小型ジョセフソン装置をツェナー電圧標準で代用できる仕様に変更し、アンプも装置に依存しないように設計の変更を行なった。これにより、最高精度を必要としないユーザーは、現在使用している校正機器を引き続き利用でき、リアルタイム・キャリブレーション装置の汎用化を実現した。



## 第 3 章 評価

## 第3章 評価

### 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

産業現場で利用可能なイントリンシック標準の開発及び複数電気量のワンストップキャリブレーションが可能な校正装置の開発は、製造・検査現場での生産性向上等に寄与するものとして産業界からのニーズが高い。また世界的に見ても科学的・技術的意義は高く、科学技術基本計画、技術戦略マップでの位置づけに沿った研究開発事業として、先進性ならびに実用性がある。さらには従来の計測器のトレーサビリティ確保の概念を超える革新性もあることから、事業の目的は妥当といえる。

しかし、社会ニーズにより応えていくためには、小型化、校正範囲の拡張等についての検討が望まれる。

#### 【肯定的意見】

- ・ 科学技術基本計画・技術戦略マップでの位置づけにのっとり、産業界からのニーズの大きい複数電気量のワンストップキャリブレーションのための開発事業として、その目的には先進性ならびに実用性がある。
- ・ イントリンシックな校正源を使った現場におけるリアルタイム・キャリブレーションは理想的な方法論であり、今後の方向性として推進すべきであり、事業の目的は妥当であると考えられる。
- ・ 産業現場で利用可能なイントリンシック標準の開発と複数の電気量の自動校正が可能な装置の開発は、従来の計測器のトレーサビリティ確保の概念を超え、革新的である。
- ・ 高精度の一次標準と使いやすいユニバーサル校正機器を繋ぐ安定かつ多ポイントの校正機器の開発という位置づけで評価できる。
- ・ 冷凍機動作のジョセフソン電圧標準の開発、長寿命の交直変換器の開発など産総研のポテンシャルを生かした研究開発であり、世界的に見ても科学的・技術的意義は高い。
- ・ 官民の役割分担としては、非常にコストがかかる量子標準の研究や評価を産総研が行い、民間企業が得意な部品開発や電子回路開発を民が行っていることから適切であった。
- ・ 製造・検査等の現場からのニーズをくみ取り実施されており、生産性の向上に寄与するものとして評価できる。新規性が高いとは必ずしも言えないが、直流/交流電圧（電流）を同一の装置で校正可能なシステムと言う点では、先導性は高い。また、国家標準を保持する機関のミッションの一つと考える。

#### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 世界的な位置づけをさらに明確にする事が今後望まれる。

- 社会ニーズに応えるためには、もう少し小型、使いやすい装置にすべき。また、電気抵抗の校正や電圧、電流範囲を拡大できれば、デジタルマルチメータやキャリブレータの市場にも食い込める可能性がある。
- 校正周期を延ばすとする、長期の安定性の評価やトレーサビリティ体系の見直しが必要。
- 電気量以外の量についての検討も望まれる。

## 2. 研究開発等の目標の妥当性

研究開発目標は、校正不確かさや長い校正周期を可能とする長期安定性など、明確かつ無理のない設定となっており、全般的には妥当なものと評価できる。設定された目標が達成できれば、国家標準へのトレーサビリティの確保における、校正に要する時間の制約という問題が解決される。

しかし、システムのサイズや AC 電圧出力など、具体的な根拠に乏しい目標設定が見られたほか、現場における雑音等の環境の影響を考慮した開発や、重要な電気量の一部についての開発、抵抗の長期安定性に関する目標等が設定されていなかった。また、高位の標準を必要としないイントリンシック標準を目指すのであれば 10 V PJVS によるシステムの開発が必要である。

### 【肯定的意見】

- ・ 安定であり、多ポイント、長い校正周期を持つ校正装置の開発という意味では明確な目標を持っている。
- ・ 目標水準についても無理の無い設定を行っている。
- ・ 目標達成度の指標については、不確かさが重要であるが、これも具体的で適切である。
- ・ 4 つにブレークダウンされた課題設定は、個別には妥当なものと評価できる。
- ・ 設定された目標及び目標水準が達成できれば、生産現場で変動する受注・生産活動に追われ、校正時間を確保することが困難である、国家標準へのトレーサビリティの確保が、イントリンシック標準の開発によって解決され、かつ、複合量を一括で校正することが可能となれば、設備の移動を含む校正時間の制約の改善が期待できる。
- ・ 従来、校正事業者が行っていたものと同程度の仕様を満たすことを前提としており、妥当な目標と言える。

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 最終ゴールとすべき数字には、具体的な根拠が必ずしも無い。例えばシステムのサイズなど。グローバルスタンダードを意識するなら、AC 電圧は 100 V ではないはず。
- ・ 校正対象を何とすべきかについては、jcss と関連し、重要な点と考えるが、法律的な整備が必要
- ・ 直流電圧や交流電圧については、目標がはっきりしているが、電流あるいは抵抗については、重要な電気量であるが、研究開発の対象となっていなかった。
- ・ 校正周期を延ばすことについては、特に抵抗については長期の評価が必要。
- ・ 高位の標準を必要としないイントリンシック標準を目指すのであれば 10 V PJVS によるシステムの開発が必要である。
- ・ 製造・検査等の現場の環境と校正事業者が校正を行う環境の違いについて、目標設定時において言明がない。両者に大きな違いがなければ問題はないが、製造現場としては雑

音環境などが、かなり劣悪な状況を想定し得る。また、本事業は当初５年で計画されていたものであり、その後３年に短縮されている。当初計画が十分に吟味された結果だったのかどうかは、判断できない。

### 3. 成果、目標の達成度の妥当性

個別に設定された目標値はクリアされており、製作された「リアルタイム・キャリブレーション装置」も明示されている。また要素技術であるジョセフソン電圧標準発生装置の小型化や薄膜型サーマルコンバータは、技術的に大きな成果である。しかし、実際の産業界での運用を考えると、サーマルコンバータのヒートサイクル劣化試験の実施や、装置の更なる小型化、上位標準に基づく校正方法、長期間の不確かさの保証など、さらなる検討が必要である。

得られた成果の学術的価値は高く、論文発表など外部発表も十分であるが、その反面、国内での研究発表件数、特許申請数については十分とは言えない。

#### 【肯定的意見】

- ・ 学術的意味での成果は大変評価できる。
- ・ 論文発表など外部発表も十分である。
- ・ ジョセフソン電圧標準装置の小型化などは、技術的には大変な成果であると考えられる。今後のさらなる進展が楽しみである。
- ・ 目標以外にも冷凍機動作の Josephson 電圧標準素子の開発など産総研のポテンシャルを生かした研究成果が得られており、一次標準としての研究でも評価できる。
- ・ 個別の目標は、一部の修正はあったもののほとんどすべて技術的にクリアされている。
- ・ 個別に設定された目標値はクリアされており、製作された「リアルタイム・キャリブレーション装置」の結果も提示されている。
- ・ 目標として掲げた数値は達成しており、その点においては評価に値する。薄膜型サーマルコンバータは、成果有体物として取り扱えるようにも感じる。

#### 【問題点・改善すべき点】

- ・ サーマルコンバータの劣化試験で、ヒートサイクルに対応する項目があるのが望ましい。
- ・ 実際の産業界においては、もっと小型化が必要であろう。
- ・ 二次標準として使う場合については、モジュール別に産総研で校正するなどの工夫が必要。
- ・ 長期間の不確かさの保証については、さらに検討が必要である。
- ・ 昨今の情勢として、大型の資金を投入した開発には、アウトリーチ活動が強く求められている。本開発も毎年度何らかのアウトリーチを行うことを意識すべきであった。また、国内会議の発表件数が多いとは言えない。大型の資金を獲得したということは国内の関連コミュニティにも応分の貢献が求められることを、より意識していただきたい。加えて、事業化を目的とした開発であるならば、特許の申請ももう少し努力をしていただきたかった。

#### 4. 事業化、波及効果についての妥当性

開発成果物の総合体である「リアルタイム・キャリブレーション装置」については、校正項目によっては校正周期を5年以上とする目処が立っており、事業化の見通しは立っている。今後、新興国での活用も期待されることから、早期の事業化展開が望まれる。

それぞれ開発成果物である「サーマルコンバータ」や「小型ジョセフソン装置」については比較的短期間で製品化等活用が見込めており、様々な波及効果があるものと期待される。

一方、デジタルマルチメータやキャリブレータの全測定範囲をカバーするにはまだ出力範囲が不十分であり、活用範囲拡大のためには装置のより一層の小型化が望まれる。

なお国内においては、5年以上に校正周期を延ばす場合、法的な整備が必要であるが、開発された技術を国際標準化するためには、同時にグローバルな視点での制度設計が必要である。

##### 【肯定的意見】

- ・ 発展途上国ではかなり有用であろう。
- ・ 校正周期を5年以上にできる目処が立っている（少なくとも電圧）ので妥当と言える
- ・ 校正項目をある程度絞れば事業化も可能であろう
- ・ 開発成果物の総合体の「リアルタイム・キャリブレーション装置」のみでなく、それぞれ開発成果物である「サーマルコンバータ」や「小型ジョセフソン装置」等の活用が見込めている。
- ・ 小型化されたジョセフソン装置については、事業目的を超えて様々な波及効果があるものと期待される。
- ・ サーマルコンバータ・小型ジョセフソン装置の製品展開は順調に行える。また最終段階での波及効果に期待できる。
- ・ サーマルコンバータ、小型ジョセフソン装置の製品化が、比較的短期間で実現できそうであり、この点は心強い。

##### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 5年以上に校正周期を延ばすとしたら、法的な整備が必要
- ・ グローバルな視点での制度設計に基づく事業展開でなければ、開発された技術がスタンダードにはなり得ない。
- ・ デジタルマルチメータやキャリブレータの全範囲をカバーするには、まだ不足と思われる
- ・ 肝心のリアルタイム・キャリブレーション装置については、性能の見直しにより前倒しで終了したにもかかわらず、製品化への展開に時間がかかりすぎるように思われる。個別装置と異なり評価に手間がかかることは理解できるものの、早期の展開が望まれる。

- 改善すべき点としては、「リアルタイム・キャリブレーション装置」の活用範囲を拡大するためには、より小型化されることを希求する。
- 本事業の達成目標がすべて「達成」という判断にもかかわらず、本来の目標であるリアルタイム・キャリブレーション装置の事業化にはさらに8年を要することとなっている。加速することが望ましいが、それが困難な理由が必ずしも読み取れない。

## 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

短い開発期間と限られた予算の中で、効率的な開発により十分な技術的成果が達成されており、産総研主導による実施体制、中途での適切な見直しを含む計画立案、スケジュール、費用対効果はおおむね妥当であったと考えられる。

一方、小型ジョセフソン素子開発に関しては、産総研内の関連研究グループとの研究協力、サーマルコンバータ開発との資金配分など、検討が十分ではないと思われる点が見いだされた。今後、スマートメータの普及などが見込まれることから、電力校正についても検討すべきと思われる。

### 【肯定的意見】

- ・ 短い開発期間と限られた予算の中で、大変大きな技術的成果が達成されていると判断される。
- ・ 計画、スケジュール等については妥当と思う。特に、産総研における技術シーズをきちんと使用していることは評価できる。
- ・ 産総研のこれまでの蓄積によって重要な開発がされており、費用対効果についても十分である
- ・ 資金配分についても妥当である。
- ・ 中途でのフィードバックシステムの代用プロセスへの変更など柔軟に研究を実施したことも含め、課題1－4を実施するための体制として適切なものであったと評価できる。
- ・ 期間中に広域震災等もありながら、比較的短期間に限られた資金で、成果を導出できていると思われる。
- ・ 標準に関連した業務であり、産総研がイニシアティブをとって実施する内容の開発である。その意味で体制は適切である。また、適切な見直しが行われており、それに従って効率的な開発が実施されたものとする。

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 量子標準のグループともっと研究協力があって良い（特に安定な抵抗器の開発など）。
- ・ 今後は、スマートメータの普及などが見込まれるが、電力について考慮しなくて良いのか。
- ・ 薄膜型サーマルコンバータ開発への資源配分が妥当であったかどうかを評価する必要があると思われる。
- ・ 当初計画が十分に吟味された結果だったのかどうかは、検証の必要性があるように感じる。

## 6. 総合評価

実施事業者の技術力、現場でのニーズをもとに妥当な開発計画が立てられており、短い期間と限られた予算の中で、イントリンシック標準による複数電気量のワンストップ校正システムを実現するための開発目標を達成したことを高く評価する。今後同システムの事業化を遅滞なく推進すべきである。また今後大きな市場を見込むには、更なる小型化あるいはモジュール化、ならびにデジタルマルチメータや多機能キャリブレーションといった機器のほぼ全測定範囲をカバーすることが重要である。校正周期を5年以上に延ばすには、長期間安定なシャントの開発とあわせて、JCSS 制度の運用法の検討が望まれる。薄膜型サーマルコンバータ、小型ジョセフソン電圧標準についても波及効果を持つ要素技術として事業化が期待できる。

しかし、国内における成果発信は十分とは言えない。比較的大型の資金が投入されていることを念頭に、学術分野への貢献や広報などの社会貢献にも意識を注ぐ必要がある。

### 【肯定的意見】

- ・ 限られた時間と予算の中で、目標とした小型システムが完成出来たことを評価する。
- ・ 特に開発された小型ジョセフソン電圧標準は、多くの波及効果を持つ要素技術としても期待できる。
- ・ 産総研のポテンシャルを生かし、一次標準と企業の校正現場で広く使われている多機能計測器を繋ぐ校正機器の開発としては学術的、技術的にも評価できる。
- ・ 従来の1点から多点の校正が可能な二次標準の開発として評価できる。
- ・ 産業界からのニーズの高い、イントリンシック標準による複数電気量のワンストップ校正システムを実現するための開発目標を達成し、その実現運用への見通しをつけることができたことは高く評価できる。
- ・ 生産現場で変動する受注・生産活動に追われ、校正時間を確保することが困難である。国家標準へのトレーサビリティの確保が、イントリンシック標準の開発によって解決され、かつ、複合量を一括で校正することが可能となれば、設備の移動を含む校正時間の制約を改善に期待できる。
- ・ 産総研のミッション、産総研の技術力、さらには現場でのニーズをもとに開発計画が立てられている。短い期間で目標を達成しており、また薄膜型サーマルコンバータの事業化の可能性も高い。概ね良好な開発と判断する。

### 【問題点・改善すべき点】

- ・ 評価資料によれば、産総研のオープンラボなど限られた場以外に、社会へ向けた発信があまりなされていないのが残念である。
- ・ 校正周期を5年以上に延すには jcass の見直しが必要。

- 安定なシャント抵抗の開発が必要。
- 大きな市場を見込むには、小型化あるいはモジュール化と、デジタルマルチメータや多機能キャリブレータといった機器のほぼ全範囲をカバーする装置が必要。
- 小課題へのブレークダウンに際しての総合的な評価が必要であったこと、ならびに、産業界からのニーズに即して、運用開始までの日程を短縮することが望まれる。
- 改善すべき点としては、「リアルタイム・キャリブレーション装置」の活用範囲を拡大するためには、より小型化されることを希求する。
- 最終目標としているリアルタイム・キャリブレーション装置の事業化が必ずしも明確ではない。
- 比較的大型の資金が投入されていることを念頭に、学術分野への貢献や広報などの社会貢献にも意識を注ぐ必要がある。

## 7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

現場におけるエンドユーザーの実戦的な試用による装置の耐久性評価は、今後の最重要ポイントとなる。また今後ソフトウェアやユーザインターフェースなどシステムの完成度を高めることが重要であり、開発パートナーの選択は極めて重要である。

また、大きな市場を獲得するためには、デジタルマルチメータや多機能キャリブレータの測定範囲をカバーできる出力機能が求められ、そのために高安定な抵抗器が必要である。今後、スマートメータの普及が見込まれ、これの校正、検定に関する研究開発、法整備が急務である。

また、一次標準の研究開発は、継続的に国家的にサポートする必要があることから、長期的な視点に立った研究計画が必要である。

無線電力伝送技術に関連して、中周波（数十kHz～数十MHz）の高精度電力計測機器の開発を支える計量標準の開発が今後重要である。また、高位の標準を必要としないイントリンシック標準を目指すのであれば 10 V PJVS によるシステムの開発が必要である。

本事業で開発した装置の早期の事業化が望まれることから、事業化に対する障害を整理し直し、より早期に事業化できる道筋を立てることを強く期待する。

### 【各委員の提言】

- ・ 最終システムとして完成するためには、現場におけるエンドユーザーの実戦的な試用が極めて重要と思われる。装置の実用的耐久性なども今後のステップにおける最重要ポイントなのは自明であろう。軽視してならないのは、操作思想、外部機器とのインテグリティ、またソフトウェアやユーザインターフェースなどシステムとしての完成度をいかに高めるかであろう。今後の開発パートナーの選択は極めて重要である。
- ・ 従来の一校の校正を行う二次標準から多点の二次標準への拡張、および校正周期を長くできるという意味で、本事業で行われている研究開発は重要であり評価できる。しかし、大きな市場を獲得するためには、デジタルマルチメータや多機能キャリブレータの範囲をカバーできる機能が必要と思われる。そのためには、高安定な抵抗器が必要
- ・ 現在、中国、韓国といった新興国が国家的に研究を含めた標準整備に取り組んでおり、日本より進んでいる部分も見られる。特に一次標準の研究開発は、直接的には産業界に大きな影響はでないが、国力を示す指標ともなりうるため継続的に国家的にサポートする必要がある。あまり、目先の利益にとらわれない長期的な視点に立った研究計画、予算のサポートが必要。
- ・ 今後、スマートグリッドに関する研究開発の進展から、スマートメータの普及が見込まれ、これの校正、検定に関する研究開発、法整備が急務。特に、ソフトウェアに関するセキュリティ問題は重要。
- ・ 近年、無線電力伝送技術が進展しており、中周波（数十 kHz～数十 MHz）の電力標準や

## 7. 今後の研究開発の方向等に関する提言

現場におけるエンドユーザーの実戦的な試用による装置の耐久性評価は、今後の最重要ポイントとなる。また今後ソフトウェアやユーザインターフェースなどシステムの完成度を高めることが重要であり、開発パートナーの選択は極めて重要である。

また、大きな市場を獲得するためには、デジタルマルチメータや多機能キャリブレータの測定範囲をカバーできる出力機能が求められ、そのために高安定な抵抗器が必要である。今後、スマートメータの普及が見込まれ、これの校正、検定に関する研究開発、法整備が急務である。

また、一次標準の研究開発は、継続的に国家的にサポートする必要があることから、長期的な視点に立った研究計画が必要である。

無線電力伝送技術に関連して、中周波（数十kHz～数十MHz）の高精度電力計測機器の開発を支える計量標準の開発が今後重要である。また、高位の標準を必要としないイントリンシック標準を目指すのであれば 10 V PJVS によるシステムの開発が必要である。

本事業で開発した装置の早期の事業化が望まれることから、事業化に対する障害を整理し直し、より早期に事業化できる道筋を立てることを強く期待する。

### 【各委員の提言】

- ・ 最終システムとして完成するためには、現場におけるエンドユーザーの実戦的な試用が極めて重要と思われる。装置の実用的耐久性なども今後のステップにおける最重要ポイントなのは自明であろう。軽視してならないのは、操作思想、外部機器とのインテグリティ、またソフトウェアやユーザインターフェースなどシステムとしての完成度をいかに高めるかであろう。今後の開発パートナーの選択は極めて重要である。
- ・ 従来の一点の校正を行う二次標準から多点の二次標準への拡張、および校正周期を長くできるという意味で、本事業で行われている研究開発は重要であり評価できる。しかし、大きな市場を獲得するためには、デジタルマルチメータや多機能キャリブレータの範囲をカバーできる機能が必要と思われる。そのためには、高安定な抵抗器が必要
- ・ 現在、中国、韓国といった新興国が国家的に研究を含めた標準整備に取り組んでおり、日本より進んでいる部分も見られる。特に一次標準の研究開発は、直接的には産業界に大きな影響はでないが、国力を示す指標ともなりうるため継続的に国家的にサポートする必要がある。あまり、目先の利益にとらわれない長期的な視点に立った研究計画、予算のサポートが必要。
- ・ 今後、スマートグリッドに関する研究開発の進展から、スマートメータの普及が見込まれ、これの校正、検定に関する研究開発、法整備が急務。特に、ソフトウェアに関するセキュリティ問題は重要。
- ・ 近年、無線電力伝送技術が進展しており、中周波（数十 kHz～数十 MHz）の電力標準や

電力計測機器の開発が必要になると考えている。この周波数帯は従来、インピーダンスマッチングを考慮しており、インピーダンスマッチングを行わない電力伝送（インピーダンスマッチングを行うと効率が落ちる）については、高精度の計測機器が無い（もちろん、一次標準も無い）。数十 MHz で数%以内の不確かさを持った標準の開発が今後重要と考える。

- ・ 高位の標準を必要としないイントリンシック標準を目指すのであれば 10 V PJVS によるシステムの開発が必要である。
- ・ またリアルタイムキャリブレーションシステムを JCSS で運用するにあたっては、使用条件ならびに使用者について、法整備も含め、きちんとした体制を構築する必要がある。
- ・ 当案件の様に、国立研究所が保有する技術を活用し、民間企業を活用できる技術開発に国の支援・援助をお願いしたい。
- ・ 世界でも産総研しかできない技術をベースとしており、その意味で開発に投資した意義は高かったと考える。だからこそ早期のリアルタイム・キャリブレーション装置の事業化が望まれる。事業化に対する障害を整理し直し、より早期に事業化できる道筋を立てることを強く期待する。



## 第 4 章 評点法による評点結果

## 第4章 評点法による評点結果

「リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発」に係るプロジェクト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○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

##### (リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発事業)

|                                | 評点   | A<br>委員 | B<br>委員 | C<br>委員 | D<br>委員 | E<br>委員 |
|--------------------------------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性           | 2.20 | 2       | 2       | 3       | 2       | 2       |
| 2. 研究開発等の目標の妥当性                | 1.80 | 2       | 1       | 3       | 1       | 2       |
| 3. 成果、目標の達成度の妥当性               | 2.00 | 2       | 2       | 3       | 2       | 1       |
| 4. 事業化、波及効果についての妥当性            | 1.80 | 2       | 1       | 2       | 2       | 2       |
| 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 | 2.00 | 2       | 1       | 2       | 3       | 2       |
| 6. 総合評価                        | 2.20 | 2       | 2       | 3       | 2       | 2       |

