

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概要

平成25年4月30日

産業技術環境局 知的基盤課

独立行政法人産業技術総合研究所

目次

1. プロジェクトの概要
2. 事業の目的・政策的位置付け
3. 研究開発目標
4. 成果、目標の達成度
5. 事業化、波及効果
6. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

1. プロジェクトの概要

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標準(普遍的な標準)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。

リアルタイム・キャリブレーション装置を実現することにより、IECなどの国際規格で要求されている検査機器、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。

実施期間

平成21年度～平成23年度 (3年間)

1. プロジェクトの概要

予算総額

2. 3億円(委託)

(平成21年度:0.9億円 平成22年度:0.9億円 平成23年度:0.5億円)

実施者

独立行政法人産業技術総合研究所

技術課題1 薄膜型サーマルコンバータの開発

技術課題2 複合量任意信号源回路の開発

技術課題3 小型ジョセフソン電圧標準の開発

技術課題4 電気標準信号発生システムの開発と評価

(再委託先)

1.ニッコーム株式会社(薄膜応用電子部品の製造)

薄膜型サーマルコンバータの劣化対策

2.株式会社SRT(電子機器の設計製造)

信号源回路の設計

3.横河電機株式会社(高い計測技術と計測器の製造)

電圧増幅器・電流増幅器の開発と評価

プロジェクト リーダー

(独)産業技術総合研究所 計測標準研究部門 中村安弘 主幹研究員

2. 事業の目的・政策的位置付け

2-1. 事業の目的

- 信号発生器、デジタルマルチメータ、FFTアナライザ、電力計等の電子計測器は、今や電気機器産業分野だけでなく、多くのものづくり産業分野で、製品開発に必要不可欠な計測器である。これらの計測器は輸入規制から国家標準へのトレーサビリティを要求されるケースがあるが、従来の持ち運び校正では産業現場の汎用機器への対応が難しい状況だった。
- このため、これらの計測器を、生産現場で任意の時間に、任意の場所で、簡単に校正することで、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目指した。
- 技術開発の成果が普及し、様々な製造や検査の現場で、高精度のトレーサビリティが確保できることで、製品検査に保証を与えることに加えて、測定精度向上による新規製品の開発や品質向上、生産性向上に貢献し、ものづくり産業の国際競争力強化につながることを期待できる。

解決のために

- ・産業現場で利用可能な**イントリンシック標準(普遍的な標準)**の開発
- ・複数の電気量の自動校正が可能な装置の開発

2. 事業の目的・政策的位置付け

2-1. 事業の目的

社会的背景(産業界のニーズ)

- 近年、安全・安心のため、製品の製造者責任が厳しく問われている。欧米では電気製品検査において検査に使用した計測器に国家標準へのトレーサビリティが求められており、検査結果の不備があると、実質輸出できなくなる可能性がある。このため、JEITA※計測トレーサビリティ専門委員会等を通じて、製品検査に使う汎用機器の校正技術の開発の要望がある。
- 製品検査の現場で使われる汎用計測器は、温度・湿度・振動等の物理的外乱の影響を受け易く、校正値の劣化が生じる。少なくとも1年以内の頻繁な校正が必要で、製造現場にとって重い負担を強いている。
- 現状のトレーサビリティシステムでは、電圧、電流、電力などの複合量を一括して校正することが難しい。産業界から複数の電気量のワンストップキャリブレーションの要望がある。
- 様々な製造や検査の現場で、校正技術、校正結果の評価、不確かさ評価が求められているが、低周波電気計測クラブ(産総研主催)の調査において、製造メーカーから検査機器にトレーサビリティを確保することが困難であるとの意見が寄せられた。
- 電気量の標準供給において、1点供給でなく、製品の性能評価において必要な複数の校正点の供給が求められている。

2. 事業の目的・政策的位置付け

2-2. 政策的位置付け

(1) 技術戦略マップ2010(計量・計測システム分野)(p7, 8参照)

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、社会生活の安全・安心、産業の競争力強化に資するため、「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。

○導入シナリオにおいて、以下が重点化されており、本研究開発の目的・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
マルチ計測、スマート化、遠隔化、計量標準内蔵、高信頼化、システム化
- ・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

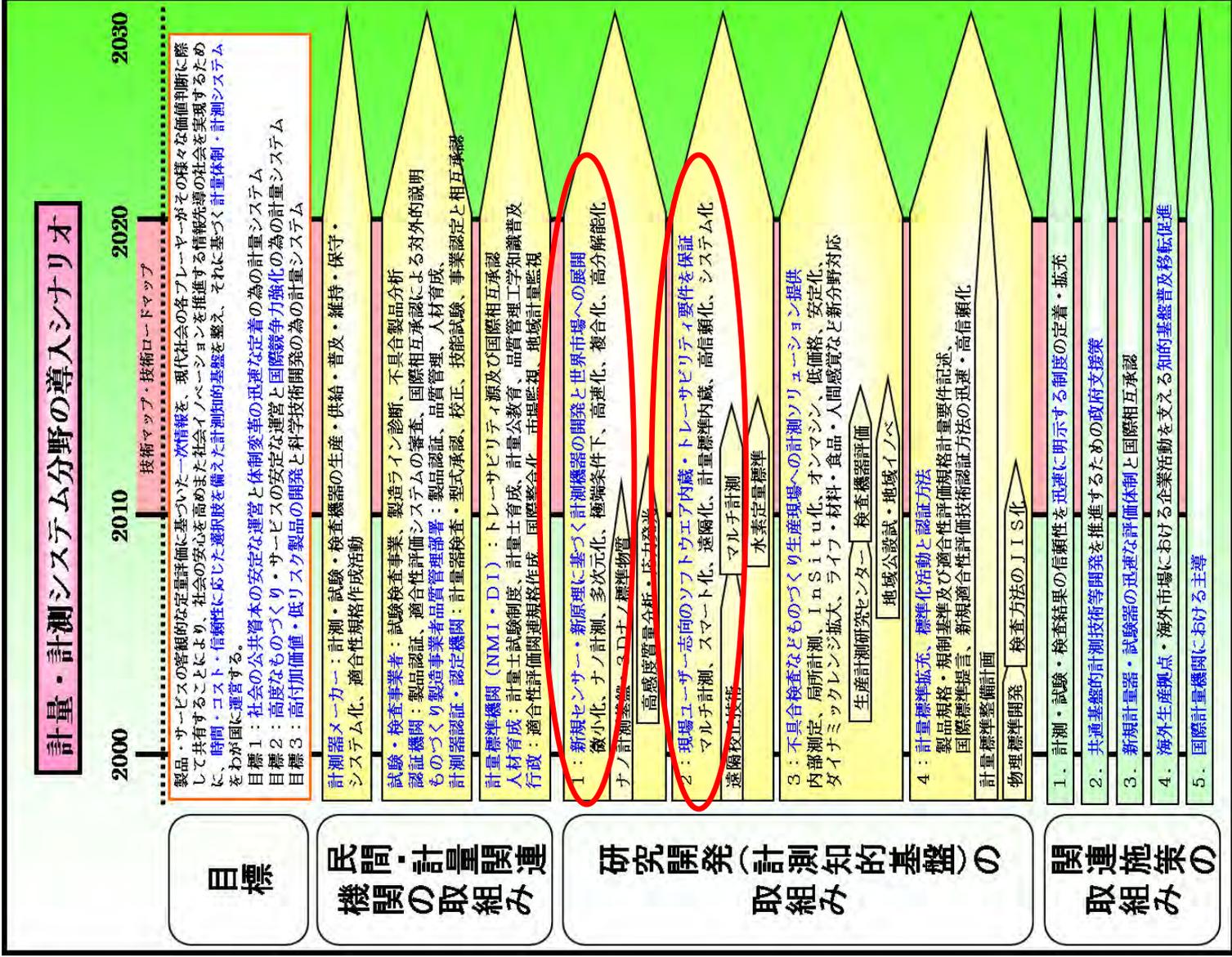
○技術マップの「電気計測 直流・低周波」において、本研究開発に対応する装置と技術課題が位置付けられている。

(2) 科学技術基本計画(第3期、第4期)(p9参照)

第3期、第4期科学技術基本計画において、利用者ニーズを踏まえた知的基盤整備の必要性が記載されており、本研究開発の目的・内容と合致している。

2. 事業の目的・政策的な位置付け

2-2. 政策的な位置付け



出所：技術戦略マップ2010(計量・計測システム分野) 導入シナリオ

2. 事業の目的・政策的な位置付け

2-2. 政策的な位置付け

➤ 技術戦略マップ2010(計量・計測システム分野) –技術マップ–

大分類	中分類	小分類	装置名	課題	技術課題 (<input type="checkbox"/> 重要課題 <input type="checkbox"/> 最重要課題)	
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)	最重要課題
				トレーサビリティ	ジョセフソン接合アレイ電圧標準を用いた電圧標準の供給維持 (1 V, 1.018 V, 10 V)	重要課題
				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)	重要課題
			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)	重要課題
				高精度化	新太陽電池基準セルの校正技術の開発	重要課題
				ゲイミックス	1000Vに対応した分圧器標準の開発 (標準の再立ち上げ、Fluke752Aなどの校正に使用)	最重要課題
		標準直流分圧器	高精度化	量子直流分圧器標準の開発 (Fluke752Aなどの校正に応用)	重要課題	
			複合化	量子ハイブリッド電圧標準の開発 (Fluke752Aなどの校正に応用)	重要課題	
			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選倍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)	重要課題
				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)	重要課題
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)	重要課題			
	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)	最重要課題	
交流電圧増幅器		高精度化	高精度広帯域ボルテージアンプの開発	重要課題		

出所: 技術戦略マップ2010(計量・計測システム分野) 技術マップ(29/71) 電気計測 直流・低周波(1/4)

(参考) USMS (United State Measurement System): 米国標準技術研究所(NIST)がとりまとめた計測技術課題においても、計量標準内蔵のシステムの開発の重要性が指摘されている。

2. 事業の目的・政策的な位置付け

2-2. 政策的な位置付け

科学技術基本法(1995年11月制定)に基づく「科学技術基本計画」 において、知的基盤の整備を推進

第1期科学技術基本計画

(1996年7月閣議決定)

研究開発活動等の安定的、効率的な推進を図る上で、知的基盤を整備することが重要。

- 計量標準の種類の大規模な拡充
- 各種試験評価方法の確立
- 生物遺伝資源、化学物質に関するデータ整備

第2期科学技術基本計画

(2001年3月閣議決定)

知的基盤の戦略的・体系的な整備を促進

- 2010年を目途に世界最高の水準を目指す
- 利用者にとっての利便性を向上
- 研究成果も有効に蓄積・整備
- 知的財産権等の基本的ルールを整備
- 今後の研究者・技術者の活動評価

第3期科学技術基本計画

(2006年3月閣議決定)

量的観点のみならず、利用者ニーズへの対応の度合いや利用頻度といった質的観点を指標とした整備を行うよう知的基盤整備計画を見直し、選択と集中を進めつつ、2010年に世界最高水準を目指して重点整備を進める。

第4期科学技術基本計画

(2011年8月 閣議決定)

今後は、多様な利用者ニーズに応えるため、質の充実の観点も踏まえつつ、知的基盤の整備を促進する。

- 国は、新たな整備計画を策定
- 知的基盤の充実及び高度化
- 緊急時に対応するための体制を構築
- 国は、先端的な計測分析技術及び機器の開発、普及、活用
- 人材の養成及び確保

2. 事業の目的・政策的位置付け

2-3. 国の関与の必要性

- 日本で開発された製品・技術が日本国内や海外で市場を獲得する際、製品の品質、安全確認のため、国際的に通用する計量標準が必要となる。計量標準は各国がお互いに計測技術や計測結果の確認を行い、その同等性を確認しており、産業基盤を支える公共財として計量標準の整備や計測の信頼性確保は国の関与が必要である。
- EUや米国では、電気製品の安全性や環境汚染防止のため、輸入する材料、部品、製品に関する試験データの提示が求められるようになってきており、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。
- 上記の要求に対して、日本の各企業が、計量標準を独自に整備することは非効率である。特に中堅・中小企業にとっては、製品の輸出における重い負担となり、標準の整備及び相互承認は国が主導して取り組む事業である。

3. 研究開発目標

3-1. 全体の目標設定

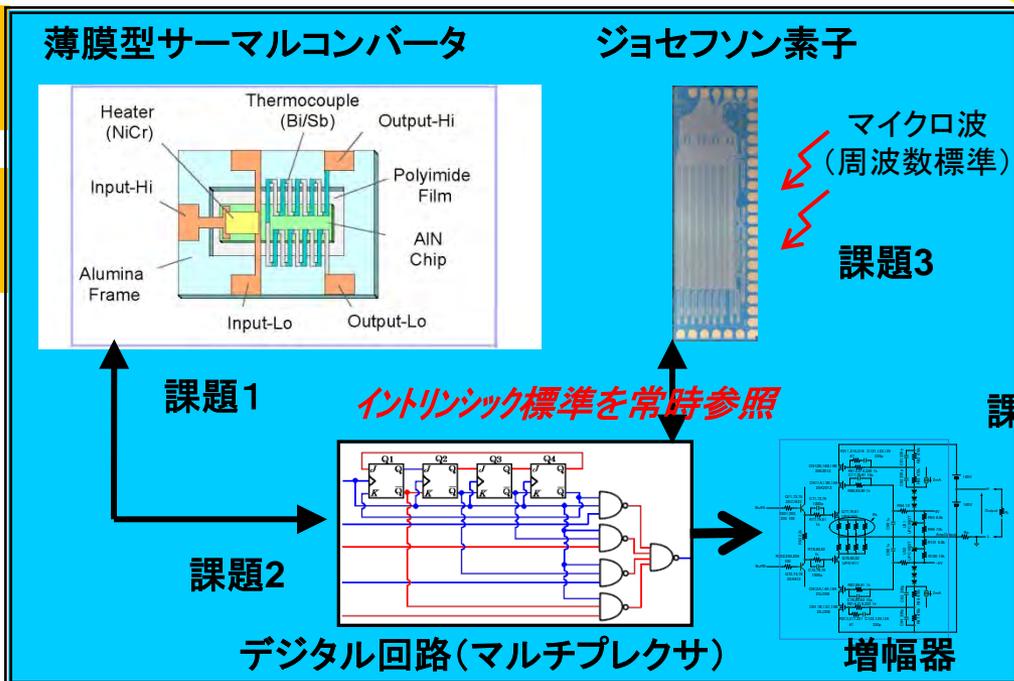
- イントリンシック標準(普遍的な標準)であるジョセフソン電圧標準と薄膜型サーマルコンバータ交直変換標準を利用して、任意の値の電気量が校正可能なシステムを開発する。
- ものづくり産業の生産現場において、任意の時間、任意の場所で、汎用電気計測器の評価、校正を実施するとともに、直流電圧・電流、交流電圧・電流などの複合量を一括して校正可能な技術の確立と装置開発を目標とする。

1. 薄膜型サーマルコンバータの開発
産総研(計測標準)・設計・試作・評価
ニッコム・作製

2. 複合量任意信号源回路の開発
産総研(計測標準)・SRT・装置設計・開発

3. 小型ジョセフソン電圧標準の開発
産総研(エレクトロニクス)
設計・評価・作製

4. 電気標準信号発生システムの開発と評価
横河電機・アンプ装置作製・評価
産総研(計測標準)・装置の統合、自動化、評価



汎用機器のトレーサビリティ確保



校正値の劣化防止

直流/交流電流・電圧の出力

- ・イントリンシック標準内蔵
- ・電気複合量を出力
- ・自動校正可能
- ・場所、時間の制約なし

リアルタイム・キャリブレーション装置

生産現場において、任意の時間、場所で、電気複合量を一括して校正可能な装置

3. 研究開発目標

3-2. 個別要素技術の目標設定

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、 <u>過電流に対して壊れやすい</u> 。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。素子の大きさは、比較的大きな能動素子のもので、3 cm×3 cm程度であることから、これ以下を設定とし、 <u>機器に内蔵可能とする</u> 。
	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。	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 <u>50 ppm/°C</u> から <u>10 ppm/°C</u> 以内に改良し、交直差の周波数特性を <u>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</u> 。
	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。 <u>従来のサーマルコンバータの価格と同程度とするため、歩留まりを9割以上に向上する</u> 。
	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、 <u>校正の信頼性</u> 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 <u>10年間使用可能な素子を開発する</u> 。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。

3. 研究開発目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
課題2:複合量任意信号源回路の開発	<p>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。</p>	<p>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準信号発生器の開発をする。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。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<u>サーマルコンバータ</u>を利用することで、さらなる精度向上が期待される。</p>
	<p>5 kHz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。</p>	<p>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。<u>5 kHz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。</u></p>

3. 研究開発目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
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。コンプレッサーの冷凍能力から、 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。	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、小型ジョ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は、液体Heを用いることは支障となる。液体Heの使用においては、日々の供給や、事故対策、コスト負担を考慮する必要がある。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とする。	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。

3. 研究開発目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
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(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。 <u>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。</u>
	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である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、 <u>5 A、50 Hzで長期安定度100 ppm以下を目指す。</u>
	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。	産業現場では、 <u>マルチメータなどの複数の電気量が一括して校正することが望まれている。</u> 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・キャリブレーション装置では、 <u>任意点において、校正された値が発生できる装置を開発する。</u> 出力範囲については、広く利用されている範囲をカバーする必要がある。

4. 成果、目標の達成度

4-1. 目標の達成度

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/°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/年の経年変化の結果 を得ている。	達成

4. 成果、目標の達成度

要素技術	目標・指標	成果	達成度
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。	達成
	5 kHz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、 5 kHz以下で、8 ppmを実現した。	達成

4. 成果、目標の達成度

要素技術	目標・指標	成果	達成度
課題3: 小型ジョセフソン電圧標準の開発	12 V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おいて1V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、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
	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。	温度制御回路については、6つのメイン回路部を独自に開発した。(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。	達成
	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。	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、直流電圧1 Vにおいて、不確かさ0.5 ppm以下の校正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UBS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

4. 成果、目標の達成度

要素技術	目標・指標	成果	達成度
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(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。	再委託先の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、短期安定度は、±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。	再委託先の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。短期安定度は、±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

4. 成果、目標の達成度

4-2. 課題と現状

リアルタイム・キャリブレーション装置の開発にあたって課題となるのは、イントリンシック標準の開発である。小型で、ロバストな持ち運び可能な標準が開発できれば、任意の時間に、任意の時に、産業現場での校正が可能となる。持ち運び可能な「イントリンシック標準」がなければ、計測精度を上げる試みだけで、頻繁な校正が必要となる。

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

従来の豆電球型サーマルコンバータは標準器として、周波数特性等の評価を行う必要があることから、ヒータ線径が25 μm と細く、ヒータ線の長さも1 cm 以内に限られていた。このため、ヒータ線に印加できる電圧が限られており、ヒータの周りはガラス球封入の真空で過電流や機械的衝撃に対して壊れやすかった。

サーマルコンバータの薄膜化への取り組み

サーマルコンバータの薄膜化の研究はドイツの国立標準機関で、1990年頃から始まり、引き続き、アメリカの国立標準機関でも開発が進められた。

薄膜化で課題になるのは、ヒータ膜と熱電対膜間の熱的絶縁である。ヒータ膜と熱電対膜はシリコン基板上に作成されるが、基板が同じであることから、熱的絶縁を確保するため、ヒータ周辺のシリコン基板をケミカルエッチングにより、薄くする方法がとられていたが、基板を薄くしたことにより、膜にストレスがかかり、膜のクラックの原因となっていた。この問題は、基板と膜の間にバッファ層を形成することで解決し、1990年後半には、薄膜型サーマルコンバータの供給が可能となった。しかし、誘電率が高く、ヒータ膜と熱電対のストレイの影響が大きく高周波特性が従来型と比べて格段に悪くなる問題があった。

この問題を解決するため、基板を誘電率の低いサファイヤに置き換え周波数特性を改善する試みが、2000年代中頃からドイツで行なわれた。サファイヤ基板で作成されたサーマルコンバータは周波数特性が改善されたが、経年変化とともに、ヒータ膜や熱電対膜がめくり上げられ壊れるという問題が見つかり、現在ドイツではシリコン基板のものも含めて作成は中断している。

4. 成果、目標の達成度

4-2. 課題と現状

プログラブルジョセフソン電圧標準(PJVS)の開発

従来のジョセフソン電圧標準(CJVS)

CJVS システムでは、ジョセフソン素子に、ヒステリシス特性をもつアンダーダンプ型接合を用いているため、所望する電圧ステップ上に動作点を導く際に、確率に依存した複数回の試行(バイアスのON/OFF作業)を要する。そのため、任意の点の電圧発生には向いておらず、現状では1 V、10 Vなどの限られた点で校正を実施している。

PJVS装置開発への取り組み

1995 年頃、Hamilton らによって「プログラブルジョセフソン電圧標準(PJVS)」が考案された。この方式では、ジョセフソン素子として、ヒステリシスのないオーバーダンプ型接合を用いている。接合アレイを1, 2, 4, 8, …, などのバイナリなセグメントに分割し、各セグメントに印加するバイアス電流をON/OFF 制御することにより、任意の出力電圧を得ることが可能となる。

現在、PJVS装置は、米国とドイツの国立標準機関で開発されており、実用化されている。しかし、いずれも4K-6K動作のジョセフソン素子を用いるため、未だに小型化には成功しておらず、液体Heを必要とする。

PJVS小型化には以下のような課題がある。

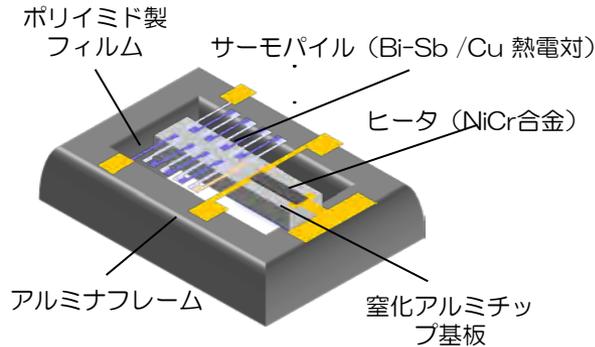
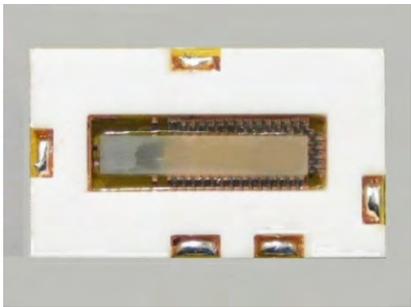
- (1) 冷凍能力の課題: 標準的な計測器サイズ内に回路と冷凍機、クライオスタットを収納するために使用可能なサイズの冷凍機は、1つしかない。この冷凍機は無負荷では10K以下に冷えるが、素子の発熱や熱流入が存在する条件では、安定的な10Kの確保は難しく、そのため小型化のハードルは高い。
- (2) 熱流入の最小化: 冷凍能力に対応するため、熱流入を最小化したクライオスタットを新規に開発する必要がある。ヒートシンク等の性能を向上させる課題がある。
- (3) 温度安定化と冷却能力の両立: 極低温冷凍機では避ける事のできない100mK程度の周期的温度変動は、通常は「シム」と呼ばれる熱伝導率の低い材料を用いて軽減させるが、これによって冷却能力は大幅に損なわれる。冷却能力を損なわずに温度の安定化することは困難である。
- (4) ジョセフソン素子の開発: 転移温度が12 Kの新しい素子を開発するため、素子の作製条件、素子の評価技術など、極めて高度な技術開発が必要となる。電圧標準として使用するジョセフソン素子は均一な素子特性が必要であり、素子数約 30000以上の素子を欠陥なく作製することは極めて困難である。

4. 成果、目標の達成度

技術課題1 薄膜型サーマルコンバータの開発成果

- 窒化アルミ基板にNiCrヒータ薄膜を、ポリミドフィルム上にBi-Sb熱電対薄膜をそれぞれ作製し、1.5 cm × 1 cm形状の薄膜型サーマルコンバータ素子の開発に成功した。
- ヒータ膜作製のアニールの条件を確立したことにより、サーマルコンバータのヒータ抵抗の温度係数は5 ppm/°C 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。

薄膜型サーマルコンバータ写真



薄膜型サーマルコンバータの交直差の周波数特性の測定結果

周波数 f (Hz)	10	20	1000	10000
旧型交直差 δ ($\mu\text{V/V}$)	30	5.6	0.6	2.1
新型交直差 δ ($\mu\text{V/V}$)	9.6	6.0	0.2	0.7

薄膜型サーマルコンバータは、電圧をジュール熱に変換するヒータと温度上昇を検出する熱電対から構成される。素子サイズは 15 mm × 10 mm である。

ヒータ線に交流電圧と直流電圧を印加し、その温度上昇を比較することで交流電圧標準が導かれる。

- ・ヒータ基板に熱伝導率の高い窒化アルミ基板を使用することで、放熱板の役目を果たし、定格電流 20 mA を達成した。
- ・熱電対膜はポリミド基板上に作製される。ヒータ基板と熱電対基板が別々であることから、ヒータ基板のみのアニールが簡単に行なえ、ヒータ抵抗の温度係数の改善に成功。

薄膜型サーマルコンバータの交直差の評価は、産業技術総合研究所が有する国家標準である交直変換標準にトレーサブルなサーマルコンバータを基準とした比較測定法によって評価を行った。

交直差の低周波特性は従来型よりと比べて半分以下に改善し、10 ppm 以下を達成した。

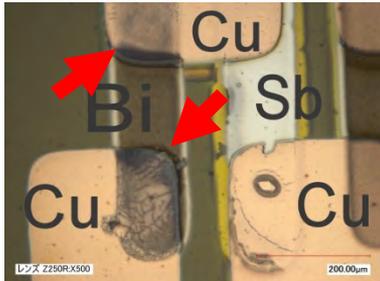
ヒータ抵抗の温度係数の改善に加えて、窒化アルミ基板の大きさを変えることで、熱的時定数も変更でき、低周波特性の原因である熱リップルを抑え、さらなる改善も期待できる。

4. 成果、目標の達成度

技術課題1 薄膜型サーマルコンバータの開発成果(つづき)

- 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、9割以上の製品歩留まりを達成し、コスト改善を達成した。
- 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、高温環境での熱電対膜の劣化が顕著であることを原因として特定した。高温対策の膜の構造対策に成功し、熱電対の高温環境での劣化防止を実現した。
- 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。交直差の経年変化も十分小さく、5年間の長期において、安定に動作する素子開発に成功した。

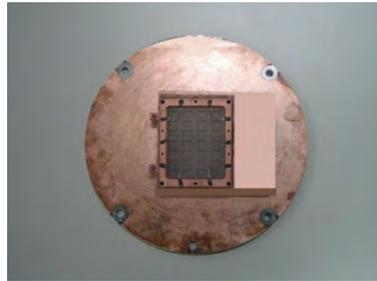
熱電対拡大写真



劣化と考えられる黒化部分(赤色矢印)

サーマルコンバータの劣化の原因は、熱電対の劣化であることが高温環境試験で判明した。上写真のようにCu-Cu、Cu-Sb、Cu-Sb、Sb-Bの組み合わせた多数の試料の内部抵抗の変化を測定した結果、Cu-Biの直接的な接触がその主な原因であった。劣化対策として、熱電対の構造を改良し、BiをSbで覆う構造を採用することで、安定な素子開発に成功した。

サーマルコンバータ作製用マスクホルダー

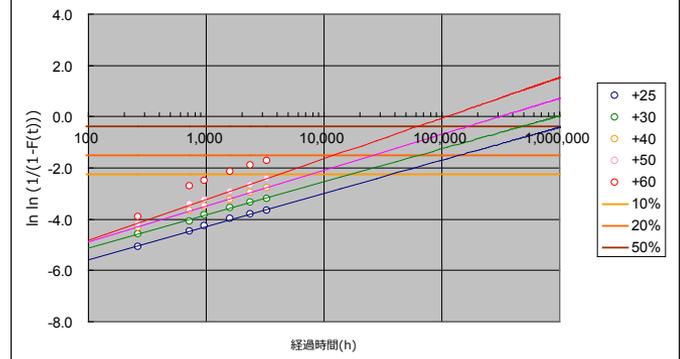


長方形の蒸着治具、円板は、真空蒸着装置へ枠とマスク用ホルダー(写真)

サーマルコンバータ製作中では、少なくとも表蒸着マスク3種類、裏蒸着マスク3種類を逐一変更しつつ、マスクアライメントが必要があるため、歩留まり劣化の原因となっていた。

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、時間もかかるため、歩留まり改善の治具を製作した。写真のホルダーを用いることにより歩留まりは9割以上に改善した。

薄膜型サーマルコンバータ素子のワイブルプロット



薄膜型サーマルコンバータ素子の推定される寿命年数

サーマルコンバータの寿命の推定には、アレニウスモデルを適用した。上右図は、熱電対の抵抗値変化 $\Delta R/R$ そのものを累積故障率 $F(t)$ と置き換えて、ワイブルプロットした図である。抵抗値が50%変化する時間を寿命と考えると、この図より、40度の連続使用環境で、約20年、50度では、約7年の寿命が推定される。

4. 成果、目標の達成度

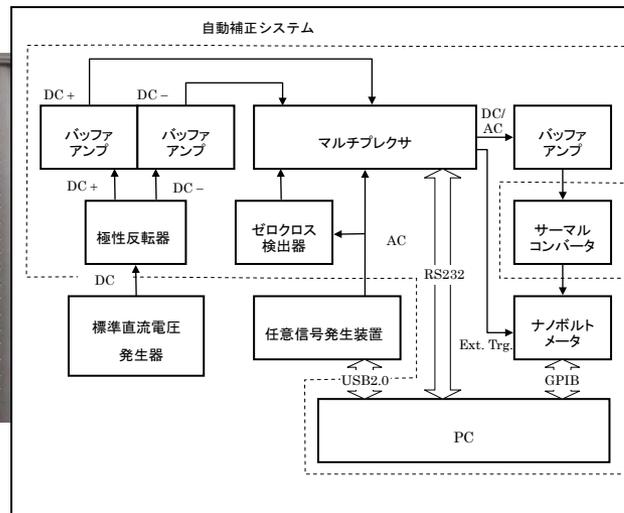
技術課題2 複合量任意信号源回路の開発成果

- ジョセフソン電圧標準とサーマルコンバータを基準とした任意信号発生装置 (標準交流電圧発生装置)を開発した。交流電圧は、サーマルコンバータを参照して、直流電圧標準とシンセサイザの振幅を比較し、交流信号の振幅を校正して、1 V~10 Vの範囲で出力することに成功した。
- 入力信号のスイッチング制御、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システムの開発を行い、5 kHz以下の周波数範囲で、8 ppmの不確かさを実現した。

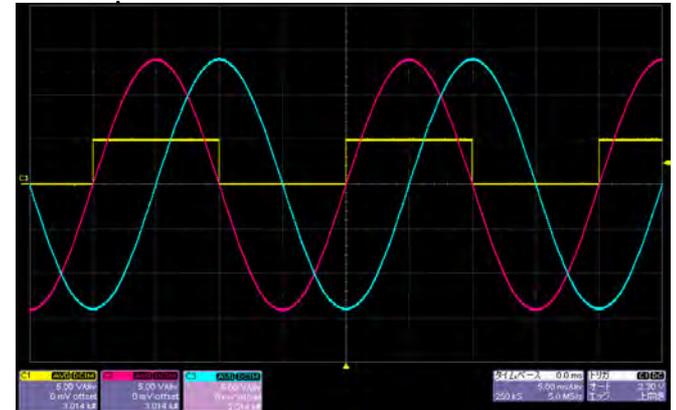
任意信号発生装置写真



- ・サイズ: 299H × 430W × 550D
- ・質量: 15 kg



基準信号発生例



Time 2 ms/div c1:同期信号 c2:電圧信号 c3:電流信号

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。

シンセサイザから発生した信号は、マルチプレクサを通して、直流電圧とサーマルコンバータで比較される。この比較校正により、シンセサイザの出力値は校正される。シンセサイザは、1 V~10 Vの範囲で出力可能で、8 ppm以下の高精度化を実現した。

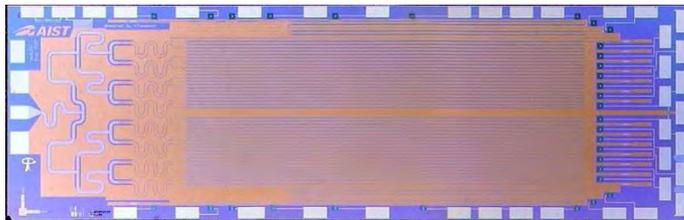
写真(上)は、任意信号発生装置から出力例である。出力電圧は10 V、周波数は 50 Hz である。任意信号発生装置は電圧増幅器と電圧-電流変換器へ2チャンネル同時出力可能で、位相も自由に選択可能である。写真では、電圧信号に対して電流用信号を90°遅れで設定している。

4. 成果、目標の達成度

技術課題3 小型ジョセフソン電圧標準の開発成果

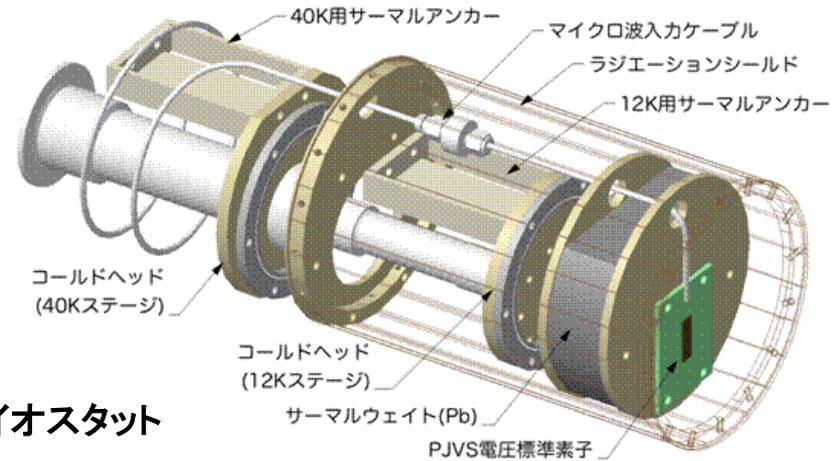
- 絶対温度12 Kで動作可能なNbTiN/Ti-TiN/NbTiN ジョセフソン素子の作製に成功した。
- 10 Kまで冷却が可能な液体He フリー・ジョセフソン素子用クライオスタットを完成した。 10 K付近で、10 mK以下の温度安定性を確認した。

ジョセフソン素子



- ・チップサイズ: 14.7 mm x 4.7 mm
- ・出力電圧: 1 V x 2回路
- ・分解能: 1 mV, 10 ビット
- ・素子サイズ: 3 μm x 3 μm
- ・素子数: 32768個 x 2回路
- ・動作温度: 絶対温度12 K (摂氏-261K)

電圧標準チップは発熱が非常に大きく(≒100mW)、バイアス配線が多いため外部からの熱流入も大きい(≒300mW)。チップの出力電圧を2 Vにおさえ、室温の回路で出力電圧を10倍にすることでチップの発熱を減らし、なおかつ動作温度を12 Kに上げることで、19インチ計測ラックに収納可能なサイズの計測器筐体に収まる小型の冷凍機を採用することを可能とした。



クライオスタット

プログラマブルジョセフソン電圧標準 (PJVS)の素子は、10mK以上の温度変動動作に対して、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100mKp-p程度の周期的温度変動が生じていた。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0.2mA程度減少させてしまう問題があった。

今回開発したクライオスタットでは、熱抵抗を大きくして温度変動を抑える代わりに、10K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 (サーマルウェイト)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採用し、温度制御を行うによって0.01K以下に抑制されることに成功した。

4. 成果、目標の達成度

技術課題3 小型ジョセフソン電圧標準の開発成果(つづき)

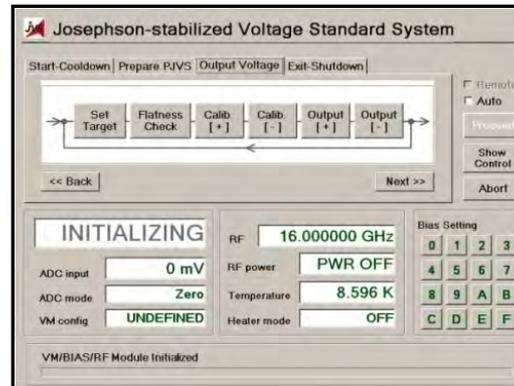
- システム制御回路(温度制御回路、バイアス回路、マイクロ波回路、電圧増倍回路)の小型化を実現した。
- ジョセフソン素子の正常動作を自動的に確認できるプログラムを開発し、0.5 ppm以下で、直流電圧の校正が可能なシステムを開発した。
- 19インチの計測ラックに搭載可能な自動校正が可能な小型ジョセフソン装置を完成した。

ジョセフソン電圧発生装置

バイアス回路 クライオスタット 温度制御回路
電圧増幅回路 マイクロ波回路



ジョセフソン装置制御プログラム



動作中のジョセフソン装置



プログラムには、以下の機能を加え、自動化を達成した。

- (1)温度測定／温度制御(2)トラップ除去
- (3)動作温度およびRFパワーの最適化
- (4)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 $\pm 0.2\text{mA}$ 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
- (5)出力電圧設定に対し、RF周波数およびアレーの選択
- (6)定電圧ステップの平坦性チェック
- (7)出力増幅電圧の校正

- ・液体ヘリウムが不要で、スイッチひとつで、マイナス 263.3°C を達成
- ・従来の冷凍機と比べて小型で、 $450 \times 270 \times 500\text{ mm}$ サイズ
- ・電磁環境雑音に対する耐性に優れた独自開発の窒化ニオブ素子
- ・ 2 V のジョセフソン電圧標準を取り出すことも可能
- ・自動運転、連続運転可能

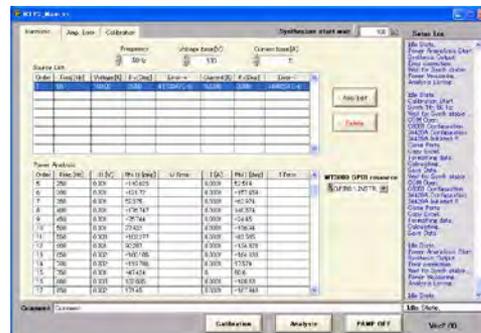
出力 2 V の低消費電力型PJVS素子を用いているため、半導体回路による精密な電圧増倍回路を用いて電圧範囲の拡大を行っている。その他にPJVSシステムを制御するために必要な制御回路系として、システムコントローラ(PC)の他に、温度制御回路、バイアス回路、マイクロ波回路の要素回路が必須である。各要素回路のモジュール化を行い、自動制御に対応している。

4. 成果、目標の達成度

技術課題4 電気標準信号発生システムの開発と評価成果

- 長期的に安定な電圧増幅器及び、電圧－電流変換器の設計、開発及び製作と評価を行った。
- 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装置を統合し、リアルタイム・キャリブレーション装置を開発した。
- リアルタイム・キャリブレーション装置は、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。

制御プログラム



電圧増幅器および電圧－電流変換器の開発と評価

リアルタイム・キャリブレーション装置では、補正済みの任意信号発生装置の出力は、電圧増幅器および電圧－電流変換器を介して、それぞれ電圧および電流が出力される。高精度化のために、電圧増幅器の増幅比誤差および電圧－電流変換器の変換比誤差を評価している。

制御プログラムの開発

リアルタイム・キャリブレーション装置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。

リアルタイム・キャリブレーション装置

構築したリアルタイム・キャリブレーション装置を用いて、任意の時間に、任意の場所で電圧・電流の自動校正（50 Hzで100ppm以下）が可能である。

電圧増幅器

電圧－電流変換器

リアルタイム・キャリブレーション装置の概観写真（写真左）。
写真中央に電圧増幅器および電圧－電流変換器。

上写真は制御プログラムのトップパネル。

4. 成果、目標の達成度

4-2. 成果リスト

要素技術課題	論文数	国内会議・ 学会発表数	国際会議・ 学会発表数	特許等件数 (出願を含む)	広報活動	受賞実績 件数
1: 薄膜型サーマル コンバータの開発	22	9	5	0	2	2
2: 複合量任意信 号源回路の開発	18	6	6	1	0	0
3: 小型ジョセフソ ン電圧標準の開発	5	1	3	1	0	0
4: 電気標準信号 発生システムの開 発と評価	0	1	0	0	2	0
計	45	17	14	2	4	2

5. 事業化、波及効果

5-1. 事業化の見通し

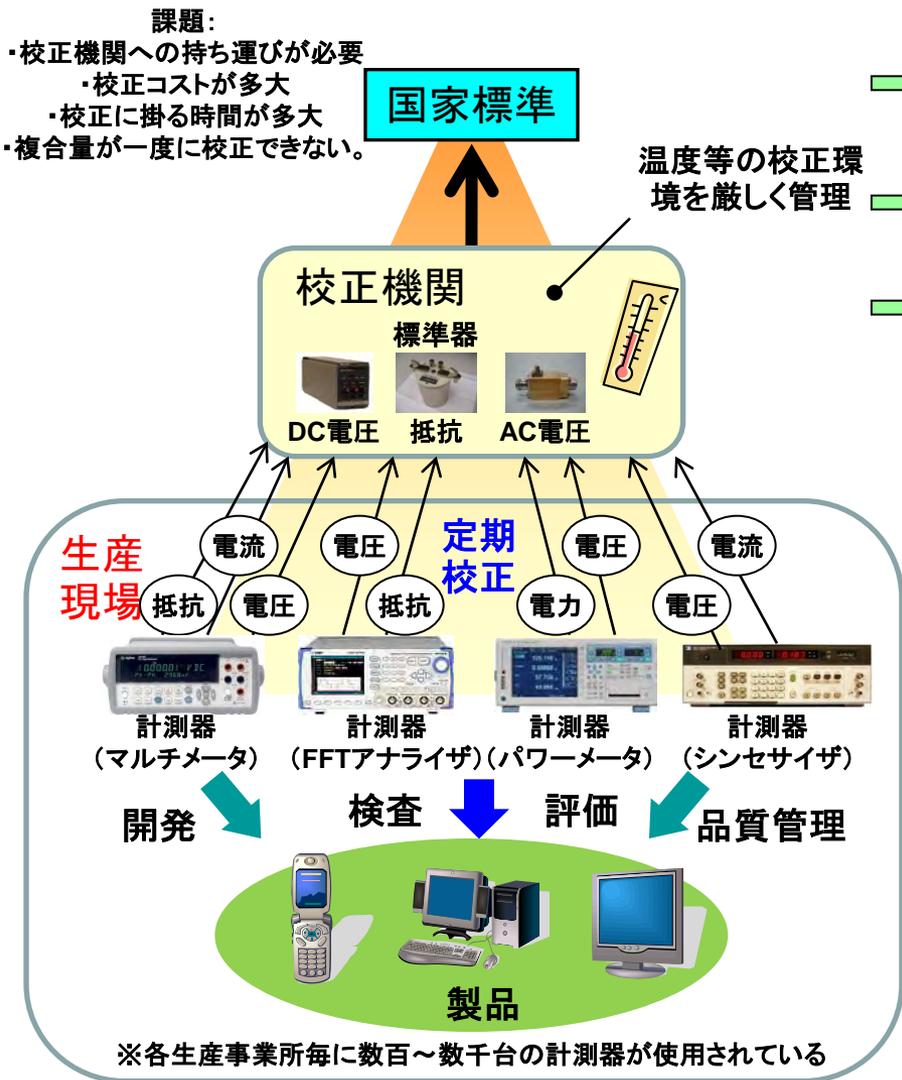
- 想定されるリアルタイム・キャリブレーション装置の利用主体は、製造現場の生産ラインの検査や製品開発の評価、JCSS校正を行っている校正事業者などである。
- また、当初、リアルタイム・キャリブレーション装置全体の製品化のみを想定していたが、個別要素(サーマルコンバータ及び小型ジョセフソン装置)の事業化も計画している。
- サーマルコンバータの製品化において、想定される利用主体は、校正事業者と各国の標準機関と計測メーカーである。交流電圧の基準となるサーマルコンバータは、高精度のものについては、本事業で開発したサーマルコンバータのみが供給可能な状態になっており、海外への販売も視野に入れている。
- 小型ジョセフソン装置の製品化において、想定される利用主体は、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器は電圧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。

<事業化スケジュール>

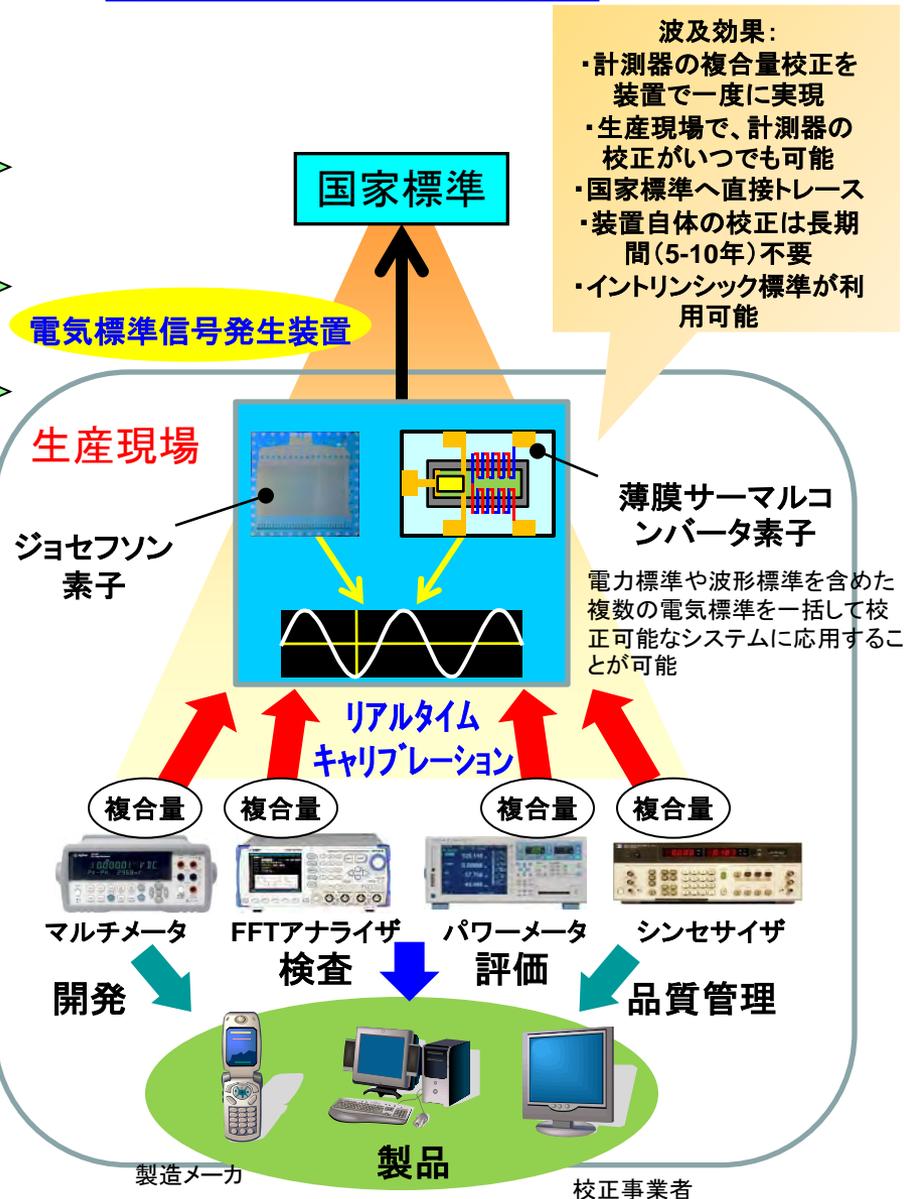
	25FY	26FY	27FY	28FY	29FY	30FY	31FY
リアルタイム・キャリブレーション装置	アンプの評価（アンプの校正システムの開発）		代表的な被校正装置を校正する場合の不確かさ評価		校正事業者、製造メーカーでの実証試験		製品化・販売
サーマルコンバータ	デバイスの環境テスト：抵抗膜、温度、気圧などを変えたテスト	環境テストの結果を反映した改善（量産品用サンプル作製）	製品化・販売				
小型ジョセフソン装置	機能の追加・改良、操作性の改善	校正事業者、製造メーカーでの実証試験		製品化・販売			

5-2. 波及効果

現状のトレーサビリティ体系



新たなトレーサビリティ体系



6-1. 研究開発計画

本研究開発事業は、4つの技術課題を設け、実施計画書に沿って平成21年度から平成23年度の3年間にわたり実施した。

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	産業技術総合研究所	加速試験法の確立	劣化防止素子試作	耐久性能実証
	ニッコーム株式会社	素子設計と評価	測定精度の向上	
複合量任意信号源回路の開発	株式会社SRT	任意信号発生源の自動補正回路の製作	FPGA回路等製作	任意信号源の開発
	産業技術総合研究所	DA変換器の評価		
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 K動作NbNジョセフソン素子の開発	クライオスタット製作	システム小型化
		制御回路の製作		
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	統合・システム化
	産業技術総合研究所			

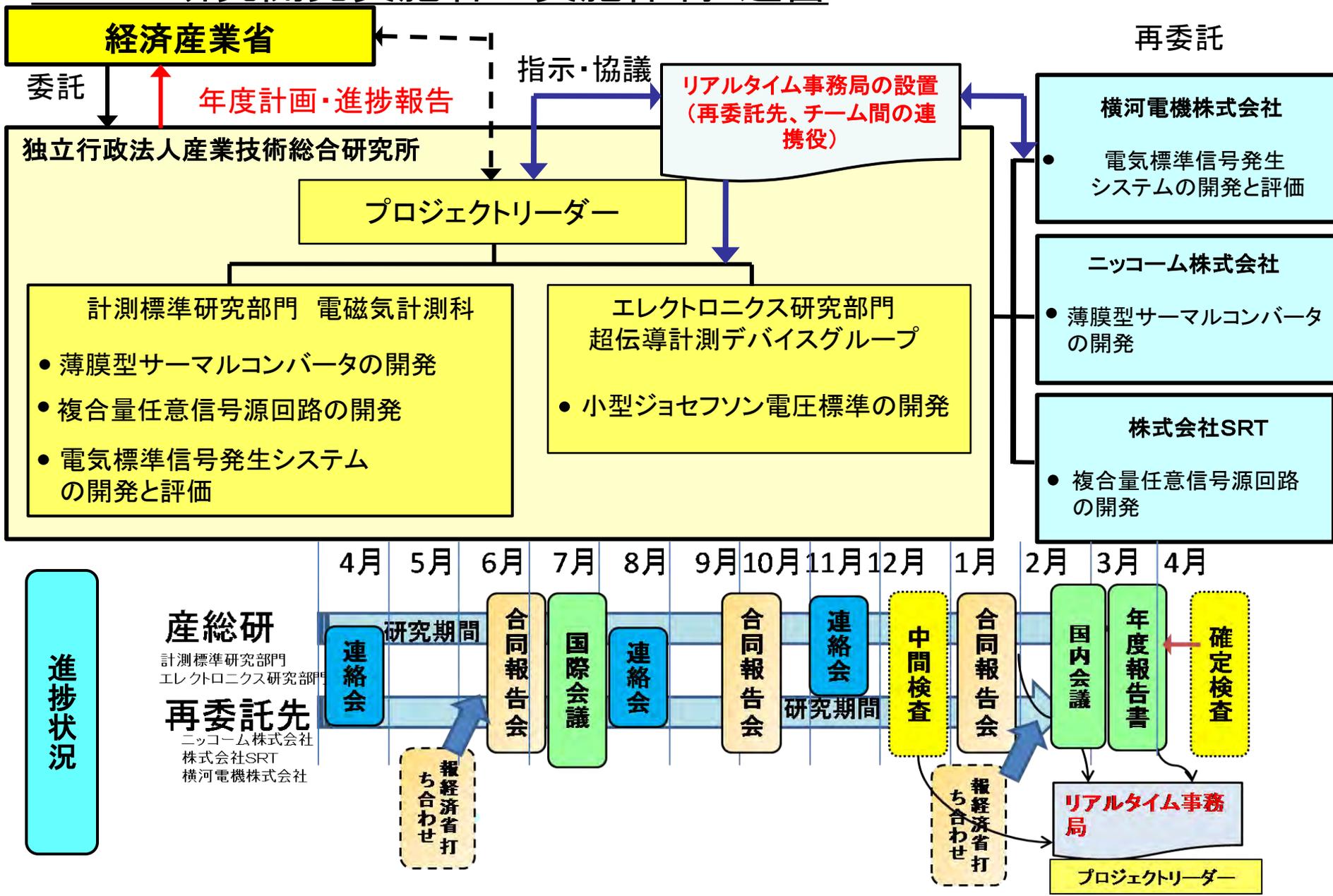
イントリンシック標準の開発

基準信号発生装置の開発

イントリンシック標準の開発

アンプの開発

6-2. 研究開発実施者の実施体制・運営



- 本研究開発事業は、4つの研究チームを編成して実施した。

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 計測標準研究部門 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 ニッコー株式会社	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 計測標準研究部門 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 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発	産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 超伝導計測デバイスグループ	超伝導集積回路、ジョセフソン電圧標準素子に関する研究
電気標準信号発生システムの開発と評価(a)	再委託先 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 計測標準研究部門 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

6-3. 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SRT	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

6-4. 費用対効果

(試算方法)

- ① 複合量電気標準信号発生システムの市場効果 >250億円
- ② 典型的な標準品事業の積層セラミックコンデンサ産業を例に試算 >550億円
- ③ ②から電気計測器産業全体への経済波及効果を試算 >1兆3300億円
- ④ 校正費用の削減効果を試算 >250億円
- ⑤ スマートメータへの波及効果を試算 >500億円 **計(②を除く) 1兆4250億円 (2020年)**

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 セラミックコンデンサ産業を例に仮試算

- ・積層セラミックコンデンサメーカー産業は、我国を代表する典型的な標準品事業のため試算に適している。検査機器の校正で移動も含め1週間程度(年間稼働率の約1%, T社聞き取り調査)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、 $1\text{千万円/年} \times 100\text{台} \times 5 \times 1/2 = 25\text{億円}$ 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。

③ ②から電気計測機器産業全体での経済波及効果を試算

・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¹⁾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で思案した効果(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。

④ 校正費用の削減効果を試算

・本装置の普及に伴い、産業現場での校正証明書、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、 $10\text{万円} / \text{件} \times 5\text{万件} / \text{年} \times 5\text{年} =$ **250億円**の校正費用削減効果が期待される。

⑤ 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)²⁾の拡大に寄与すると仮定すると、 $1\text{兆円} \times 5\% =$ **500億円**の経済効果が期待される。

出展: 1) 日本電気計測器工業会プレリリース 2012-2016中期見通し

2) 日経BP 2011ニュースリリース スマートメータの市場規模予測/日経新聞 2011クリーンテック最前線

6-5. 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。

○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。

○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。

○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、市販のツエ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エ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。

参考資料

リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発

薄膜型サーマルコンバータとジョセフソン素子と組み合わせ、文字通りのイントリンシック・キャリブレータを実現し、校正周期の飛躍的な拡張と任意の複合量を現場測定機器へのトレーサビリティを保証する。

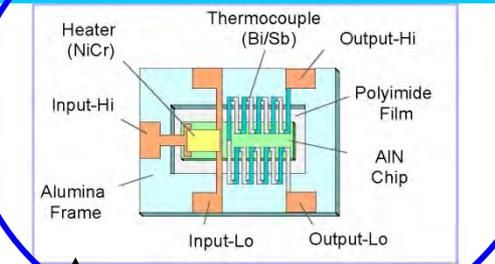
産総研・設計・試作・評価

ニッポン・作製

産総研・ナノエレクトロニクス部門
設計・評価・作製

「品質管理」「性能評価」「ULマーク」

薄膜型サーマルコンバータ



ジョセフソン素子



マイクロ波
(周波数標準)

課題3

課題1

イントリンシック標準を常時参照

課題2

デジタル回路(マルチプレクサ)

増幅器



汎用機器のトレーサビリティ確保



校正値の劣化防止



・長期間校正不要
・電圧・電流・電力の複合量を広範囲に出力

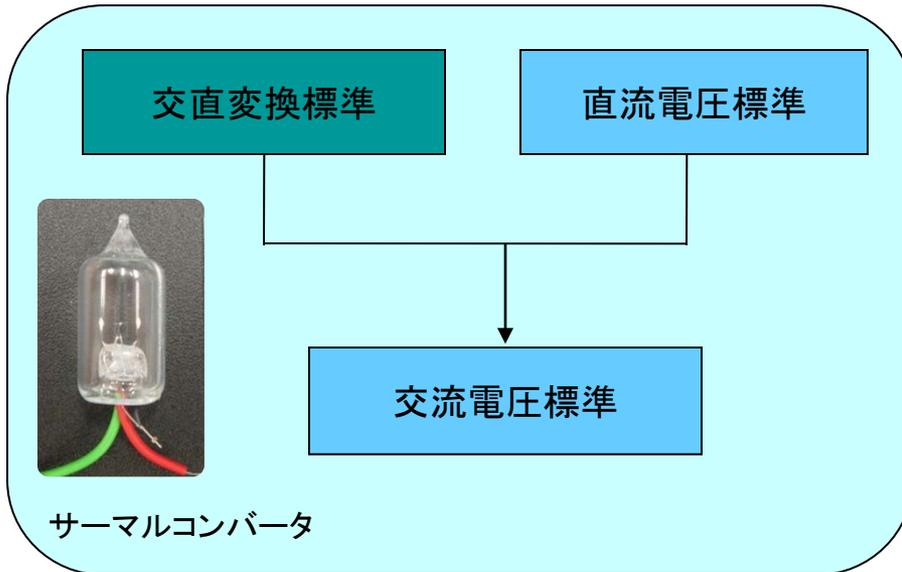
課題4

産総研・SRT・装置設計・開発

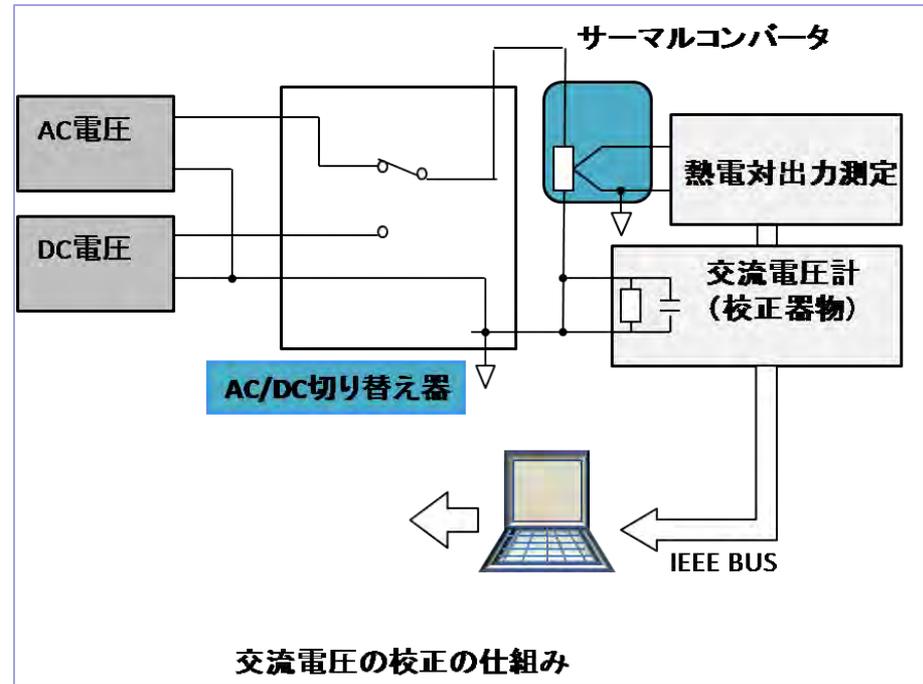
横河電機・アンプ装置作製・評価

参考資料

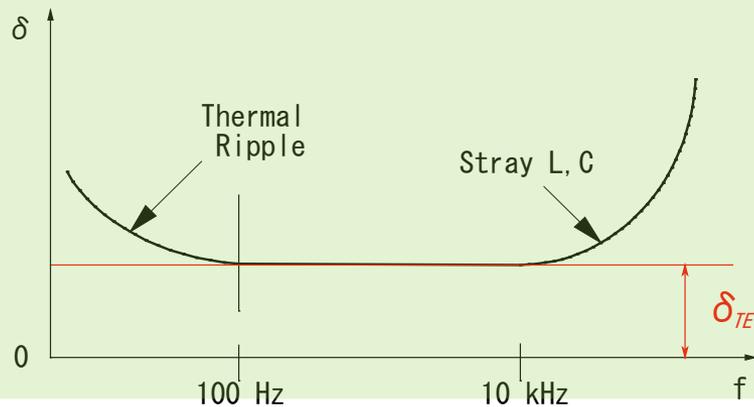
交流電圧標準は熱型の交直変換器(サーマルコンバータ)の直流電圧から交流への交直変換誤差を用いて、導かれている。



交流電圧標準校正システム



サーマルコンバータの交直差(交直変換誤差)の周波数特性



交流電圧計、
交流電流計



交流電圧発生器、
交流電流発生器

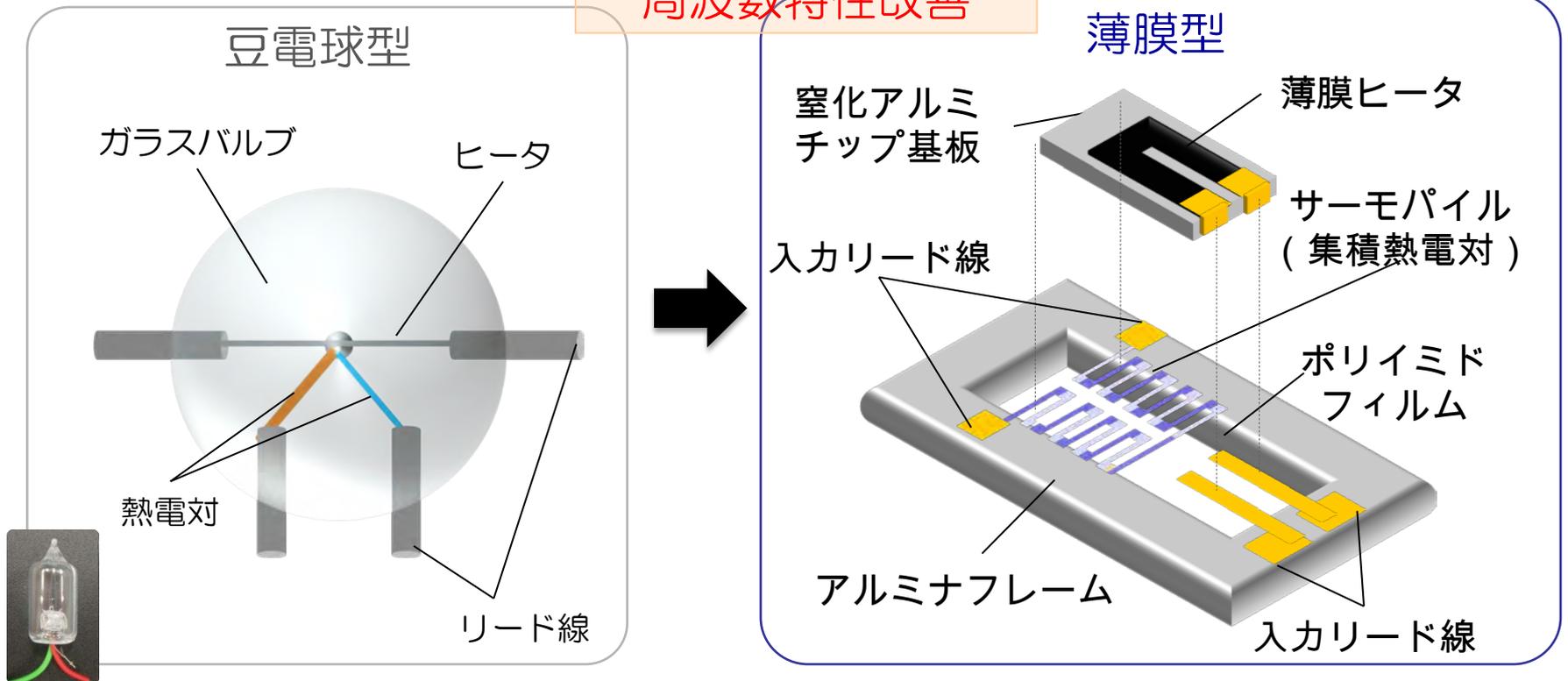
交流電圧標準



参考資料

- 従来の豆電球型は過電流や衝撃に弱く周波数特性が大きい。
- 豆電球型から高耐久性能を有する薄膜型サーマルコンバータの開発を行った。

過電流, 衝撃に強い
周波数特性改善



小型ジョセフソン電圧標準の研究開発

直流電圧標準の研究開発

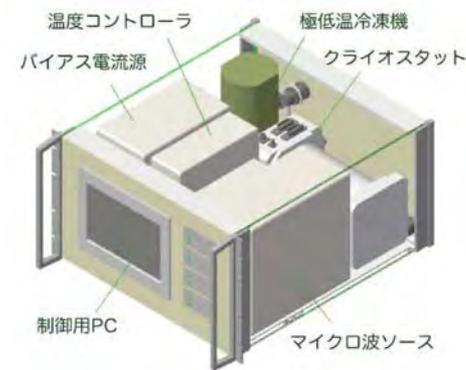
→動作マージンの向上、出力電圧の任意電圧化、システムの小型化



直流10V 国家標準



10V 冷凍機動作
(2008年)



小型可搬型システム
(2012年)

小型極低温冷凍機とシステム制御回路を一体化させたコンパクト型ジョセフソン電圧標準を開発。

小型冷凍機対応の12K動作ジョセフソン素子作成技術を開発。