

# リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発

## 評価用資料

平成25年4月30日

経済産業省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. 事業の目的・政策的位置付け.....	1
1-1 事業の目的.....	1
1-2 政策的位置付け.....	3
1-3 国の関与の必要性.....	5
2. 研究開発目標.....	7
2-1 研究開発目標.....	7
2-1-1 全体の目標設定.....	9
2-1-2 個別要素技術の目標設定.....	10
3. 成果、目標の達成度.....	16
3-1 成果.....	16
3-1-1 全体成果.....	16
3-1-2 個別要素技術成果.....	18
3-1-3 成果リスト.....	47
3-2 目標の達成度.....	53
4. 事業化、波及効果.....	59
4-1 事業化の見通し.....	59
4-2 波及効果.....	60
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	62
5-1 研究開発計画.....	62
5-2 研究開発実施者の実施体制・運営.....	63
5-3 資金配分.....	65
5-4 費用対効果.....	66
5-5 変化への対応.....	67

## 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、汎用計測器の校正値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（普遍的な）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。



大分類	中分類	小分類	装置名	課題	技術課題 ( ) 重要課題 ( ) 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)
				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(1V, 1.018V, 10V)
				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(1V, 1.018V, 10V)
			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
				ダイメックレンジ	1000Vに対応した分圧器標準の開発(標準の再立ち上げ、Fluke752Aなどの校正に使用)
	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)		
		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)		
		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源および量子電流標準の開発(放射線、光標準、微粒子速度標準に応用)	
			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、微粒子速度標準に利用)			
	交流	交流電圧	交流電圧交流電圧比較装置	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、交流変換器標準の応用)
交流電圧増幅器			高精度化	高精度広帯域ボルネー・ジャンプの開発	

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きている。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 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。

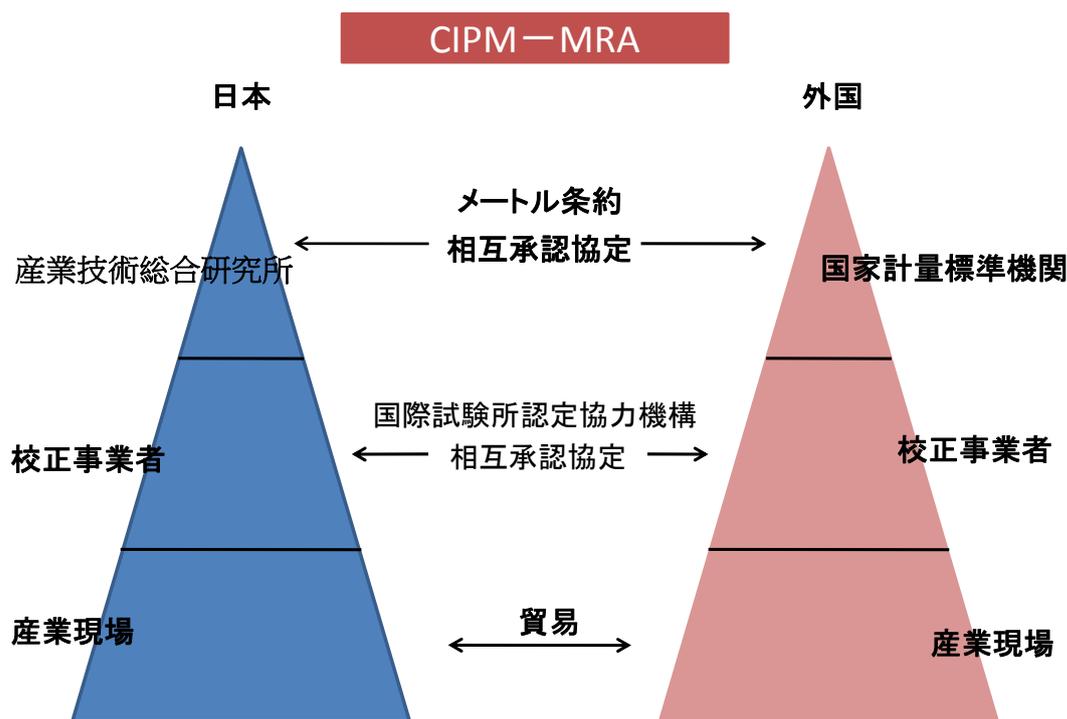


図1-3 計測のトレーサビリティ体系と国際相互承認

## 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。

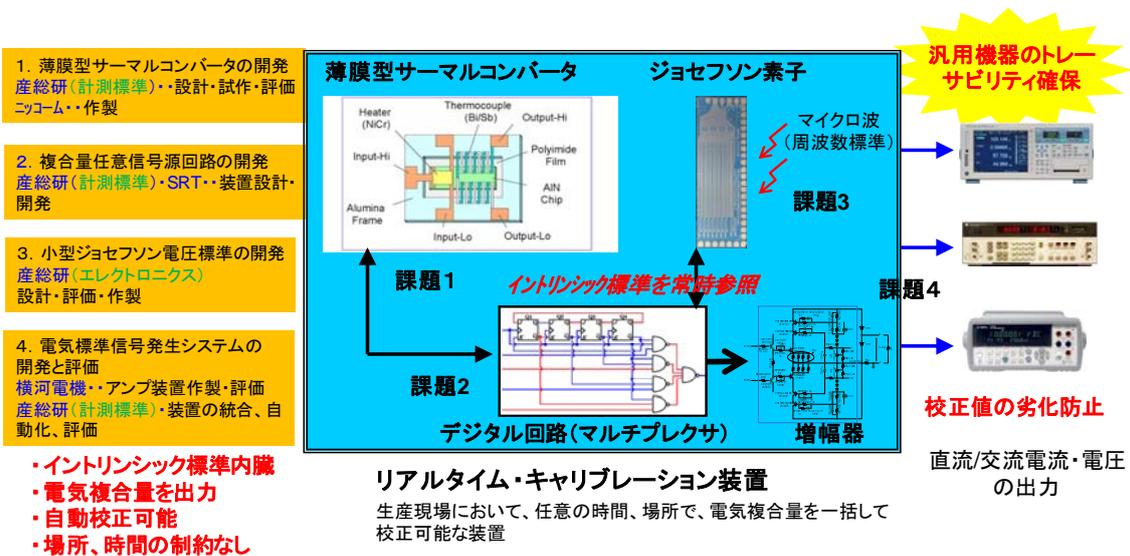


図2-1 リアルタイム・キャリブレーション技術の概念図

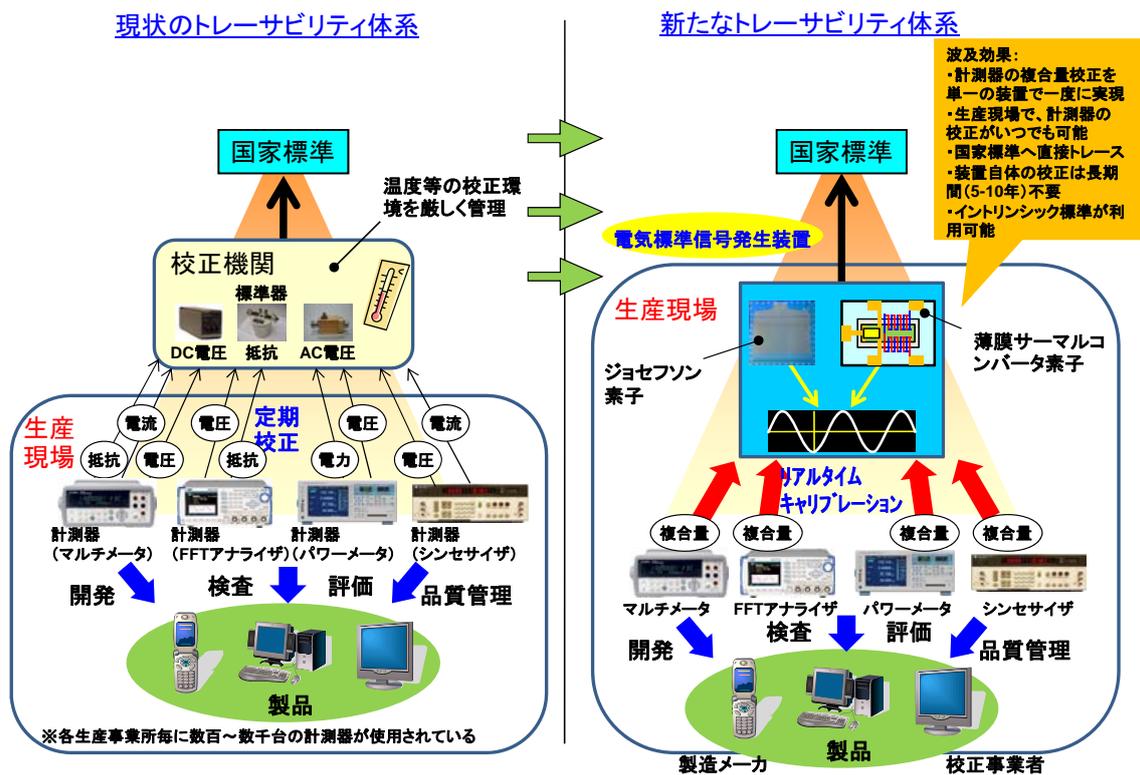


図 2-2 トレーサビリティ体系図

## 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、任意な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、頻繁な校正が不必要となり、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。 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3cm×3cm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10Vまでの電圧を印加することから、ヒータ抵抗500Ωの場合、20mAの電流が流れる。従来のサーマルコンバータ定格電流は10mA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、3cm×3cm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10ppm/°C以下に抑え、熱的時定数を最適化することで、低周波特	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50ppm/°Cか

課題 1 : 薄膜型サーマルコンバータの開発	性を 10 ppm 以内に改善する。	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 までの電圧を発生できる	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

	装置を開発する。	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 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 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	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

課題3：小型ジョセフソン電圧標準の開発	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。	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	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

<p>課題3：小型ジョセフソン電圧標準の開発</p>	<p>0.5 ppm 以下での校正能力を持つことを目標とする。</p>	<p>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。</p>
<p>課題4：電気標準信号発生システムの開発と評価</p>	<p>課題2の任意信号発生装置の出力（最大10V）を増幅し、100V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、100V、50Hzで長期安定度100ppm以下の電圧増幅器を開発する。</p>	<p>電圧の範囲については、商用電圧の100V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、100V、50Hzで長期安定度100ppm以下を目指す。</p>
	<p>課題2の任意信号発生装置を用いて、5A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。5A、50Hzで長期安定度100ppm以下の電圧-電流変換器を開発する。</p>	<p>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5Aまで発生可能な装置を開発する。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、5A、50Hzで長期安定度100ppm以下を目指す。</p>
	<p>課題1～3のシステムを統合し、産業現場で、直</p>	<p>産業現場では、マルチメータなどの複数の電気量</p>

<p>課題4：電気標準信号発生システムの開発と評価</p>	<p>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 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>が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。

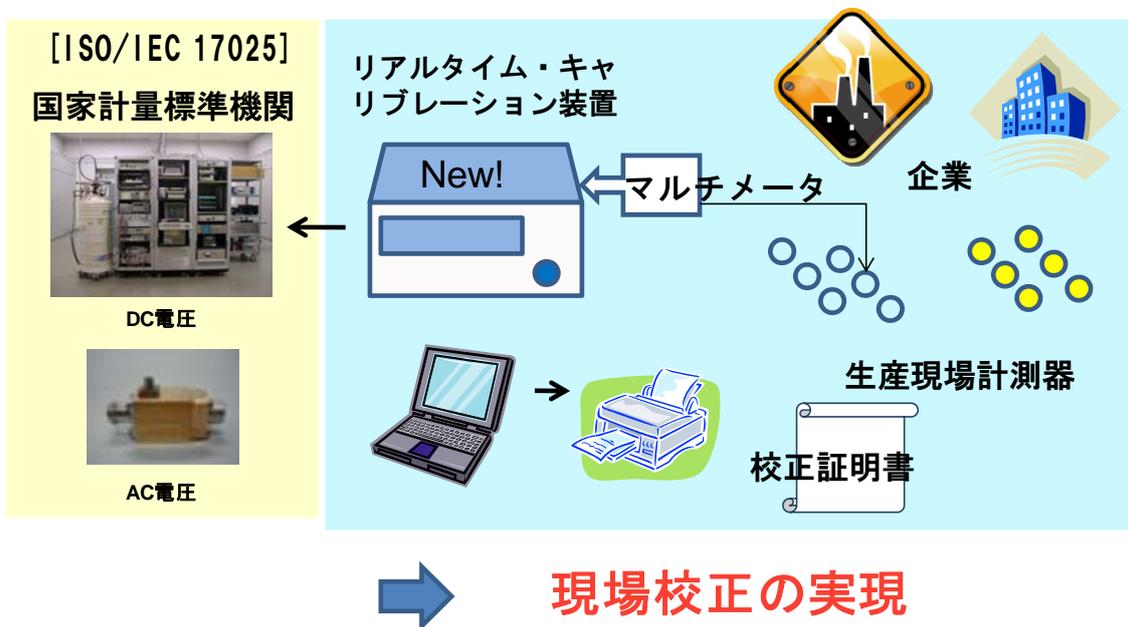


図3-2 リアルタイム・キャリブレーションの概念図

### 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。

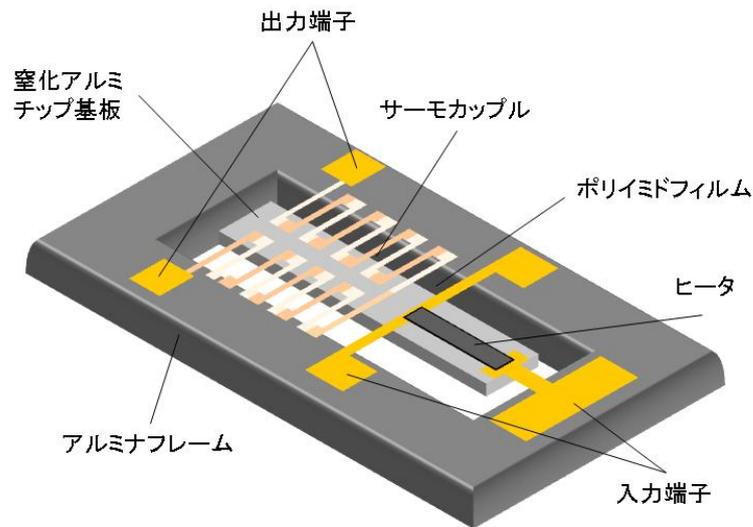


図3-3 薄膜型サーマルコンバータの模式図

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 $25\text{ ppm}/\text{C}$ から、マイナス $10\text{ ppm}/\text{C}$ 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。

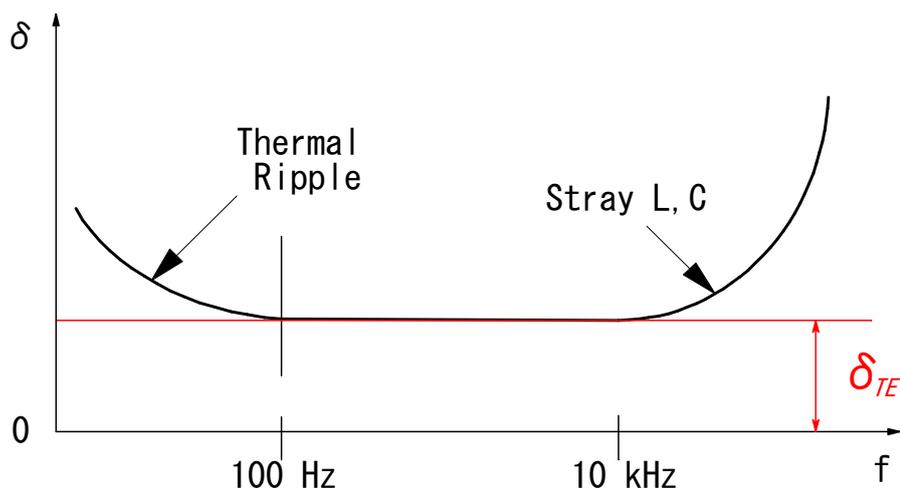


図 3-4 サーマルコンバータの交直差の周波数特性図

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 $\delta$ ( $\mu\text{V/V}$ )	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、その内部抵抗値は、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。

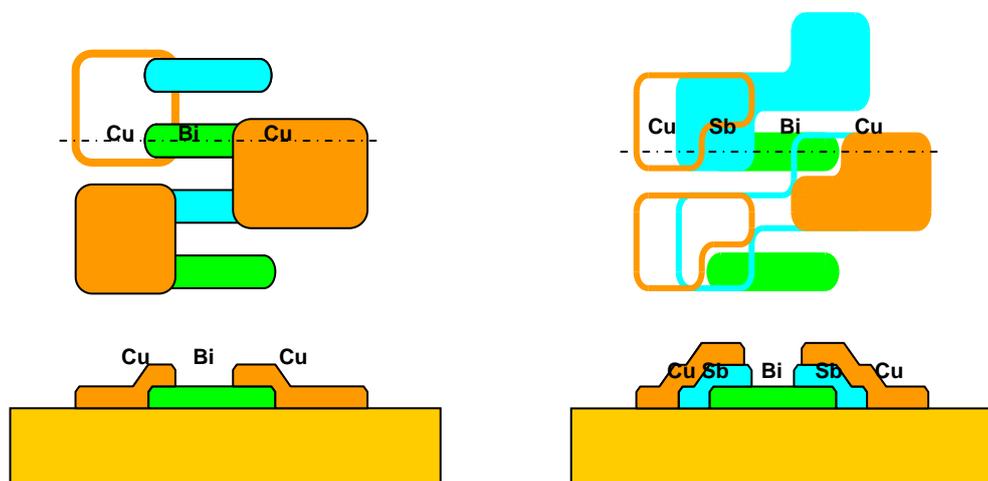


図 3-5 熱電対の劣化が顕著な熱電対パターン(左)、改善した熱電対パターン(右)

新しいパターンでは、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事実から、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。方法は、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℃、+25℃、+30℃、+40℃、+50℃、+60℃、+70℃、+80℃、+125℃、+155℃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。

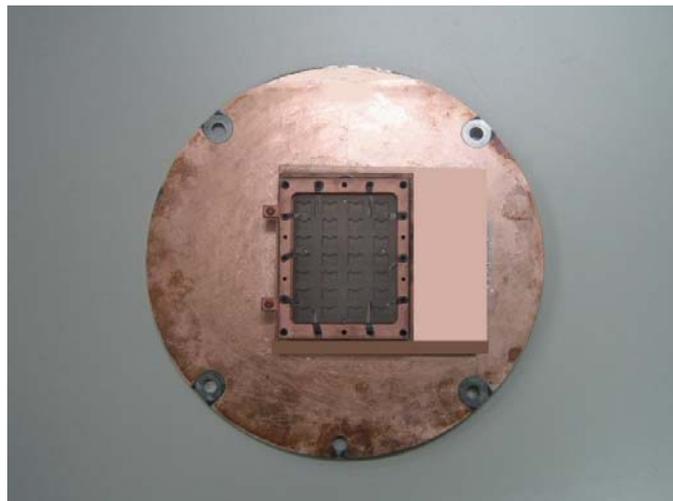


図3-6 熱電対蒸着治具

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±10 μmが達成され、歩留まりも9割以上に向上した。

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。

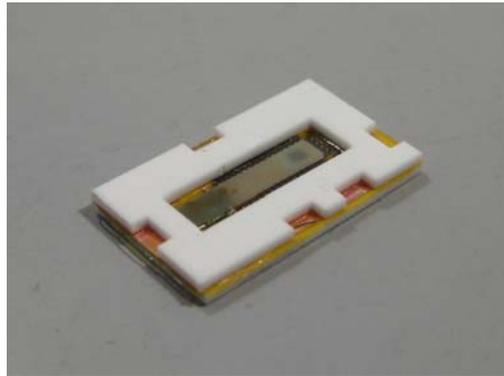


図 3-7 薄膜型サーマルコンバータ

(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)。

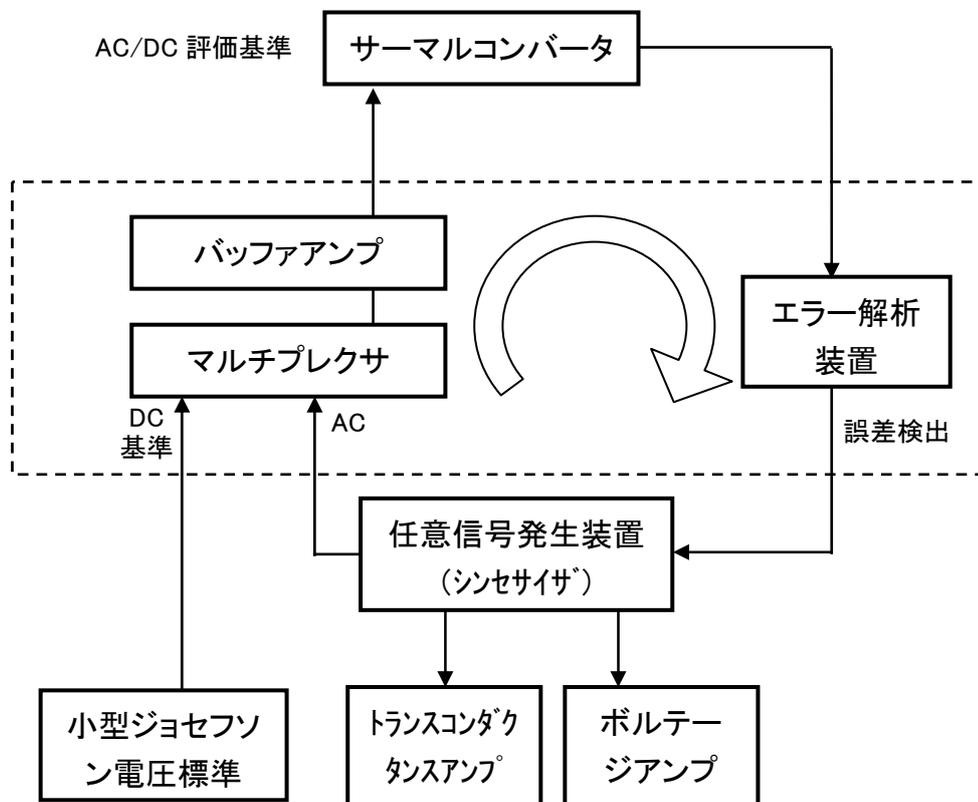


図 3-8 任意信号発生装置自動補正システム

任意信号発生装置自動補正システムの開発のために、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させるためには、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で示した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、課題1の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 Ω）に合わせた広帯域回路設計を行い、8 ppm以下の高精度化を実現した。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、5 kHz以下で不確かさ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)。

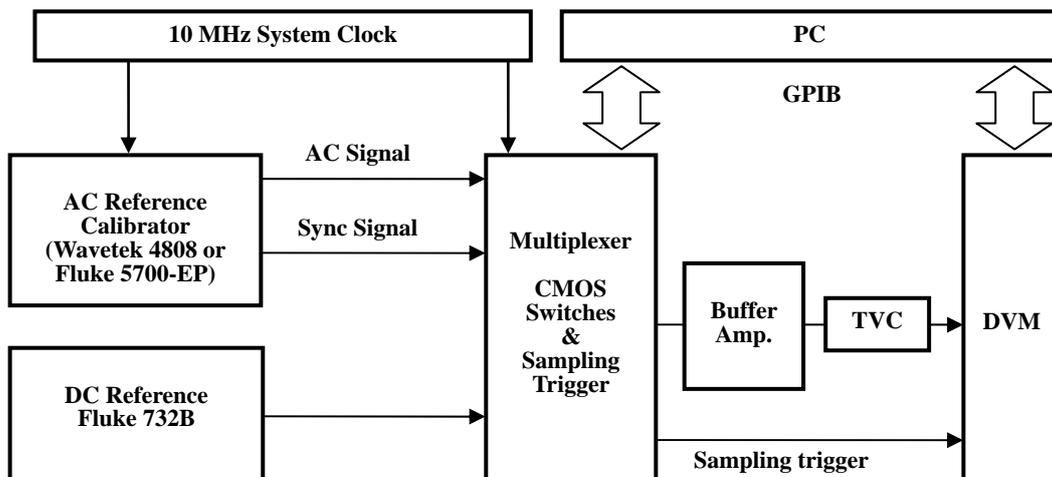


図 3-9 交流電圧評価測定システム  
(TVC: サーマルコンバータ、DVM: デジタルマルチメータ)



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

研究課題3においては、液体Heフリーで動作可能なプロマ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 素子の作製をおこなった(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  $\text{kA}/\text{cm}^2$  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、 $T_c=14.7$  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。

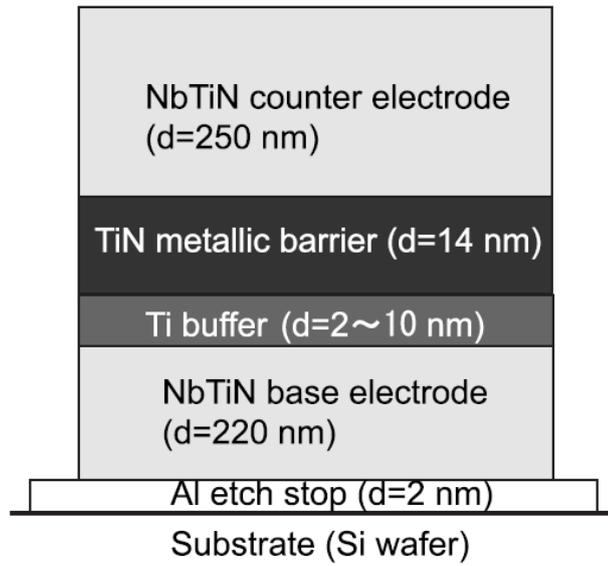


図 3-1 1 NbTiN/Ti-TiN/NbTiN ジョセフソン接合の断面図

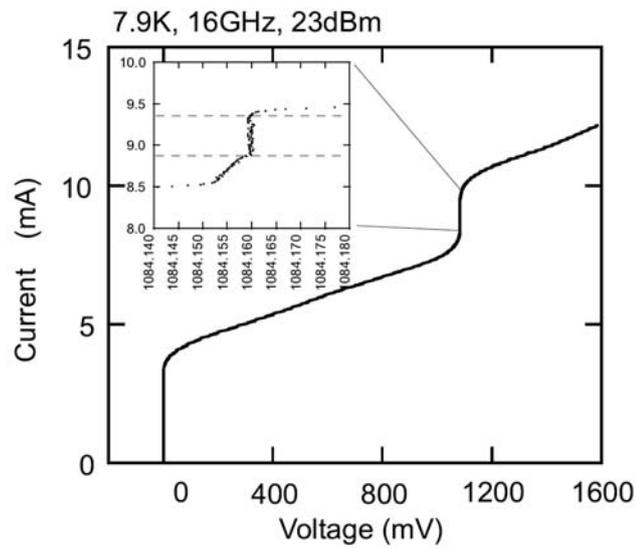


図 3-1 2 バイナリ D/A 回路(NbTiN/Ti-TiN/NbTi 接合アレー)の出力電圧

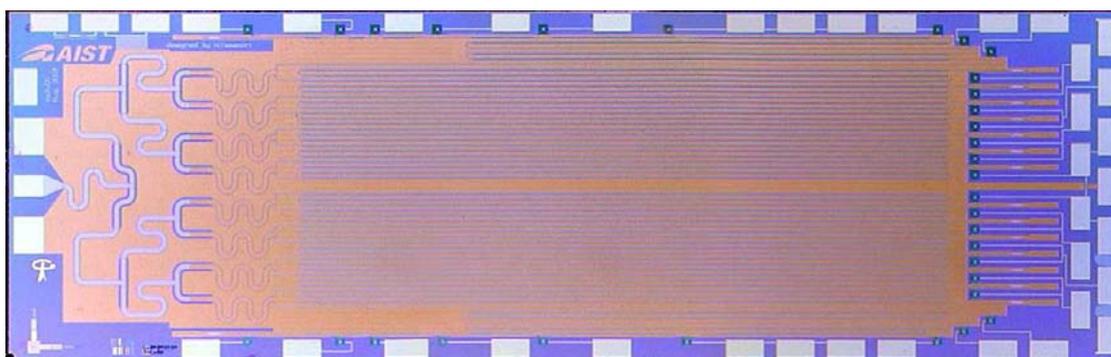


図3-13 電圧標準チップ写真 (14.7 mm×4.7 mm)

## [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 Model22 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。

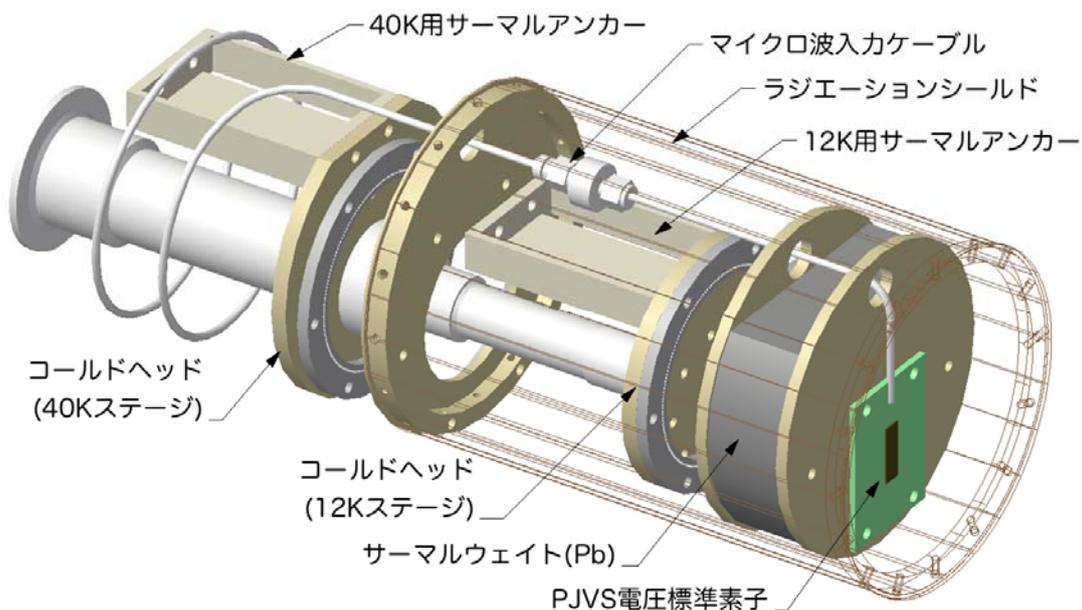


図3-14 クライオスタットの構造

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  $6 \text{ J/K}$  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  $1 \text{ K/W}$  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 (12K) 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、オプ्ट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 3-1 5 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 基板を直流専用に最適化し、(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。

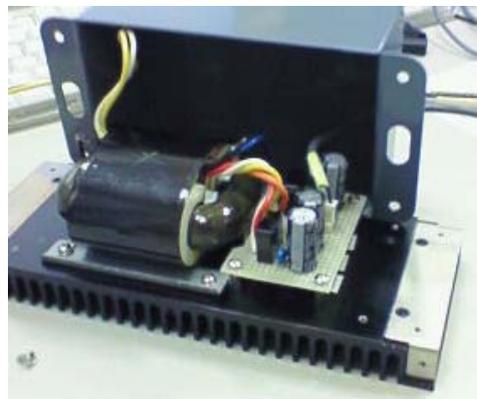


図3-16 BIASモジュール(下は電源回路部)

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 3-17 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 逓倍器で 8 GHz に変換した後、さらに 2 逓倍器で 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 逓倍器の制御には、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 3-17 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 3-18 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 3-18 VMx10 モジュール電源回路

図3-19 (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3-19 (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。

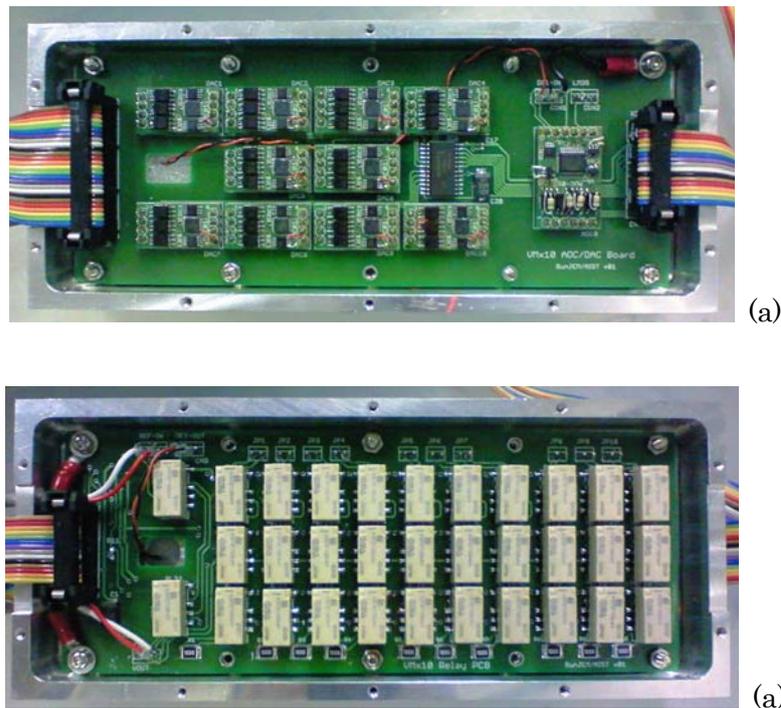


図3-19 電圧増倍回路基板  
(a: DAC/ADC 回路基板, b: 低熱起電力リレー回路基板 )

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 431mm 高さ 249mm 奥行き 550mm の小型ジョセフソン電圧標準システムを実現した(図 3-2 0)。



図 3-2 0 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。

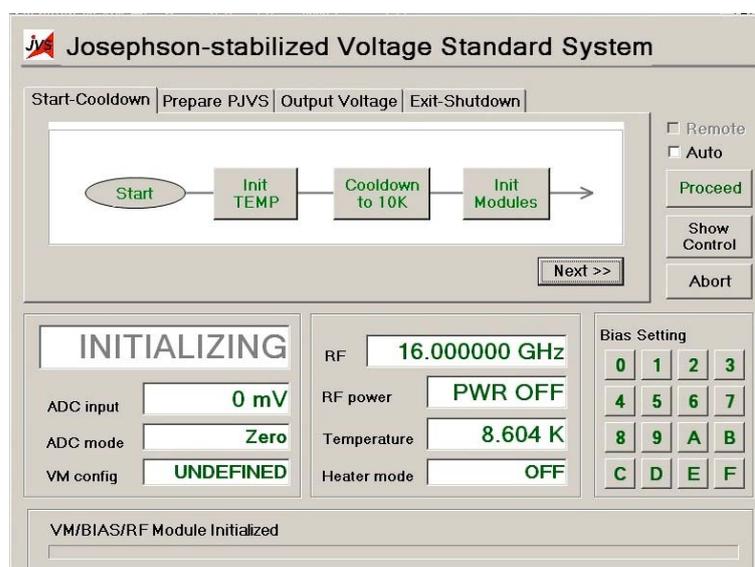


図 3-2 1 ジョセフソン電圧発生装置の初期化画面

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3-22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。

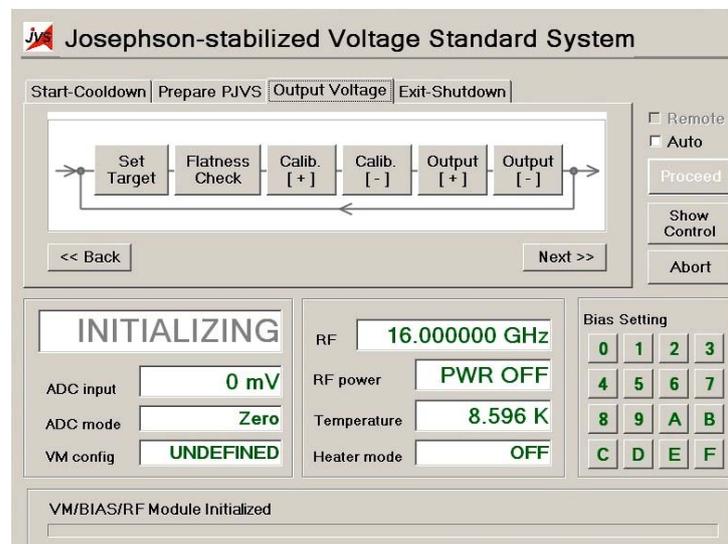


図3-22 電圧発生／校正用画面

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

研究課題4においては、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3-23と図3-24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。

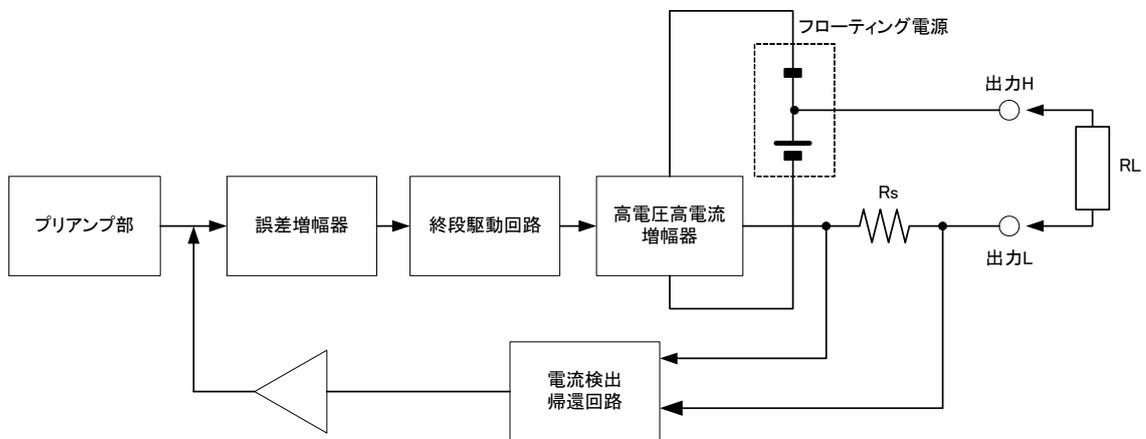


図3-23 電圧－電流変換器主要構成部分のブロック図

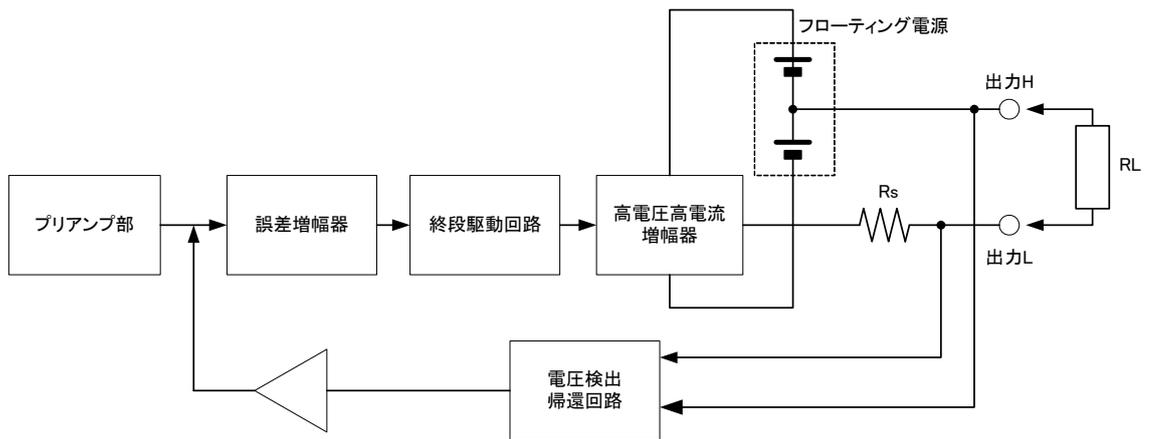


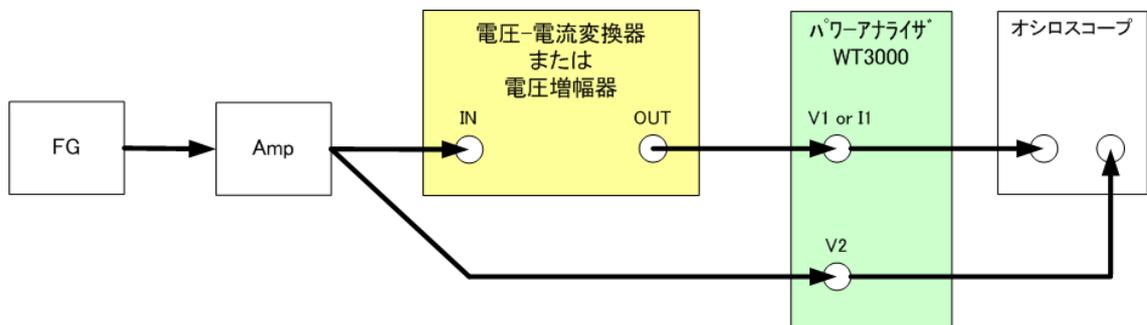
図 3-2 4 電圧増幅器主要構成部分のブロック図

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。

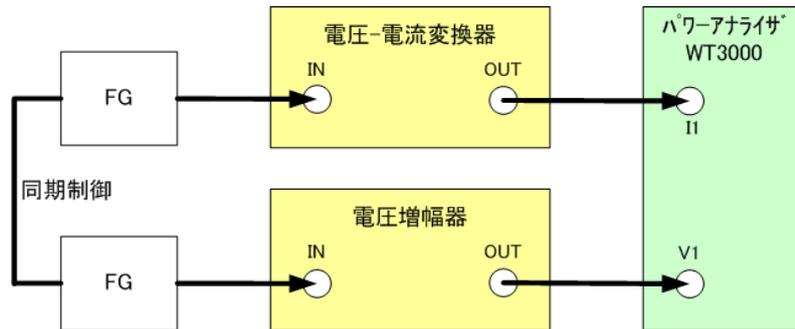
表 3-3 目標仕様

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

制作した試作器の評価方法を図 3-2 5 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 (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 (条件) 入力: 定格の 100% @50 Hz 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 (条件) 入力: 定格の 100% @50 Hz 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 (条件) 入力: 定格の 100%, 70%, 50%, 10% 周波数: 50 Hz, 150 Hz, 500 Hz, 1 kHz ~ 10 kHz は 1 kHz 毎
長時間安定性	(目的) 増幅率・変換率の安定性の測定 (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
位相安定性	(目的) 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 (条件)

	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
短期安定性	±20 ppm	±10 ppm
温度特性	7 ppm/°C	3 ppm/°C
周波数特性	-1 dB 以下@10 kHz	<u>-1.5 dB 以下@10 kHz</u>
経年変化特性	55 ppm@1000 h	65 ppm@500h
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)。

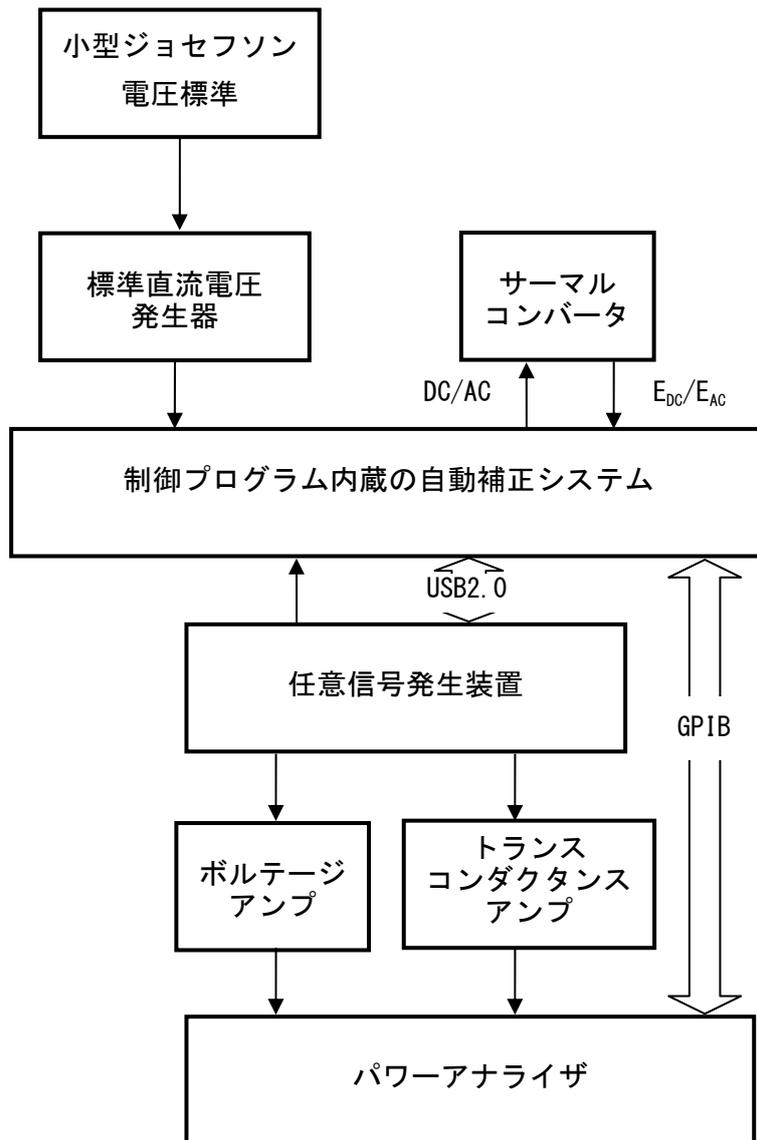


図 3-2 6 実際に構築した複合量電気標準信号発生システム

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、課題2の任意信号発生装置の AC 信号の振幅値が補正される。具体的には、任意信号発生装置の 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任意信号発生装置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 任意信号発生装置の出力制御・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。

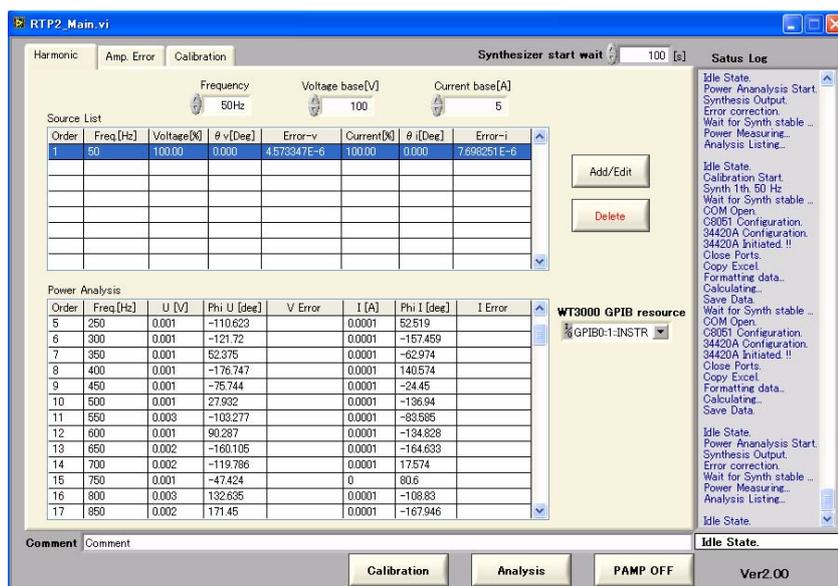


図3-27 制御プログラムのトップパネル

### [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

任意信号発生装置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。

#### (ii) トランスコンダクタンスアンプの誤差評価

任意信号発生装置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

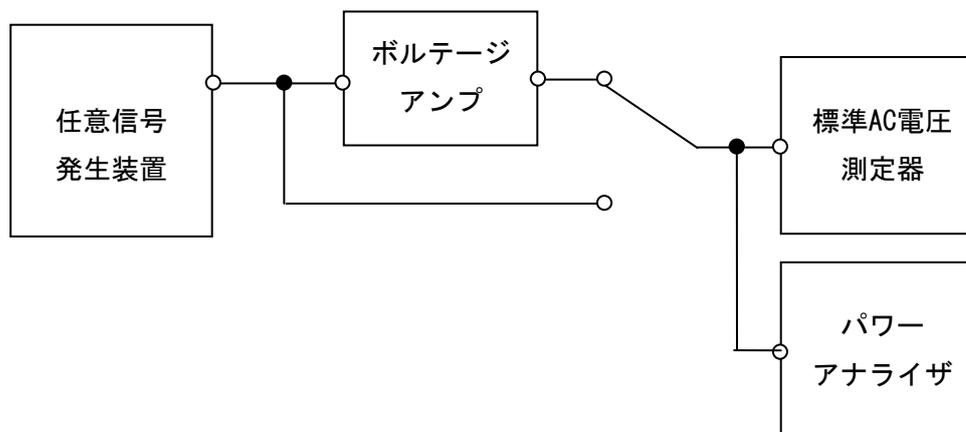
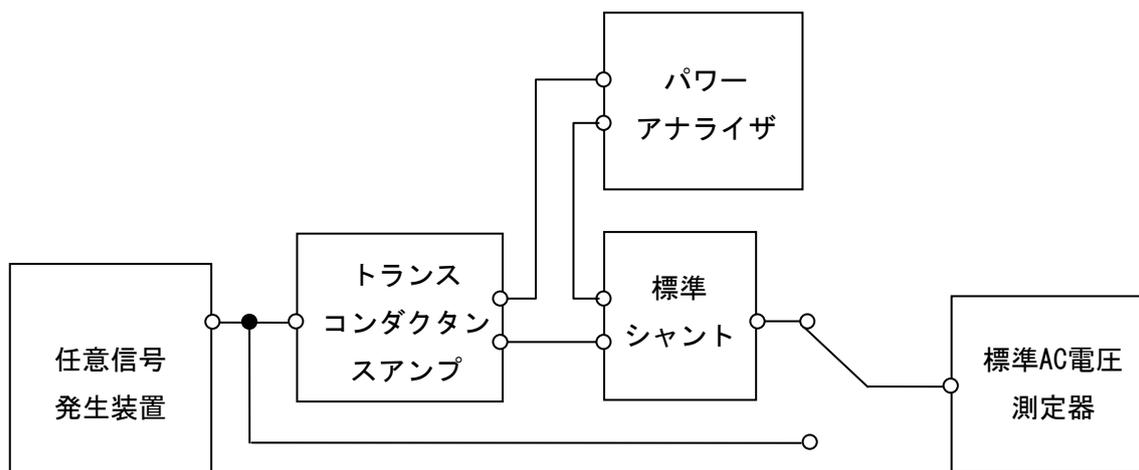


図3-28 ボルテージアンプ誤差評価試験回路

トラ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と標準シャントを直



列接

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

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。

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任意信号発生装置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。

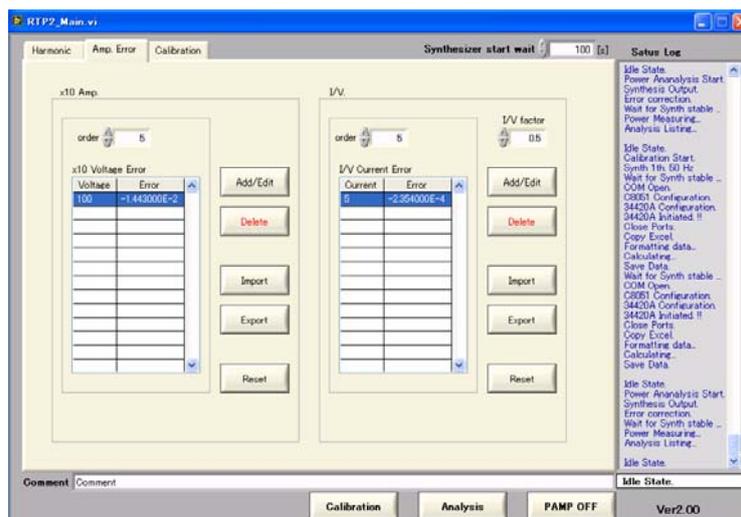


図3-30 ボルテージアンプおよびトランスコンダクタンスアンプ  
のエラー補正設定画面

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0V～100V、0kHz～3kHzまで任意の値が発生可能で、電流範囲も、0A～5A、0kHz～3kHz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	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

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	Proceedings of ISEC2009 「Improved fabrication yield for 10V programmable Josephson voltage standard」	H21.6
	Proceedings of ISEC2009 「Current margins of digital to analog converter using meander Josephson junction arrays for quantum voltage standards」	H21.6
	Proceedings of ISEC2009 「Development of a reliable cryopackaging technique for Josephson voltage standards」	H21.6
	JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 「Precise measurement of a	H21.7

	20-V programmable Josephson voltage standard system]	
	第 70 回応用物理学会学術講演会予稿集「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
	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」	H21.9
	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 「Single-chip 10-V programmable Josephson voltage standard system based on a refrigerator and its precision evaluation」	H22.2
	第 57 回応用物理学関係連合講演会予稿集「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講演論文集「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講演論文集「薄膜型サーマルコンバータの周波数解析」	H22.3
	IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY 「Improved fabrication yield for 10V programmable Josephson voltage standard circuit including 524,288 NbN/TiN/NbN Josephson junctions」	H22.4
	SUPERCONDUCTOR SCIENCE & TECHNOLOGY 「Large constant voltage generated with a single array including 65536 Nb/TiN/Nb Josephson junctions」	H22.6
	Proceedings of CPEM2010 digest 「Development of a compact voltage standard based on NbN/TiN/NbN array operating at 10 K」	H22.6
	Proceedings of CPEM2010 digest 「12 K operation of 2 V Josephson voltage standard circuit using NbN/TiN/NbN junctions」	H22.6
	Proceedings of CPEM2010 digest 「Frequency characteristics of calculable thin-film multijunction thermal converters above 1 MHz」	H22.6
	Proceedings of CPEM2010 digest 「Calibration-free arbitrary power calibrator with self-calibration by ac-dc measurement technique」	H22.6
	Proceedings of CPEM2010 digest 「Verification and uncertainty evaluation of an ac shunt calibration system at power frequencies」	H22.6
	Proceedings of CPEM2010 digest 「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予稿集「Nb/TiN/Nb 接合アレーの自	H22.9

	己発振フェーズロックによる高出力電圧化」	
	IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTAION AND MEASUREMENT 「Evaluation of low-frequency characteristics of a thermal converter using programmable Josephson voltage standard」	H22. 11
	JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 「Preparation of overdamped NbTiN Josephson junctions with bilayered Ti-TiN barriers」	H22. 12
	第 58 回 応用物理学関係連合講演会予稿集 「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講演論文集 「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
	IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTAION AND MEASUREMENT 「Uncertainty evaluation of an ac shunt calibration system with a load effect reduction circuit」	H23. 7
	IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTAION AND MEASUREMENT 「Development of thin-film multijunction thermal converters with a novel structure」	H23. 7
	平成 23 年度電気学会基礎・材料共通部門大会講演論文集 「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
	IEICE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS 「NbN-based overdamped Josephson junctions for quantum voltage standards」	H24. 3
	IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTAION AND MEASUREMENT 「Improved measurement of ac-dc transfer difference using a low-drift single-junction thermal converter」	H24. 3
	IEEJ TRANSACTIONS ON FUNDAMENTALS AND MATERIALS 「Development of low-frequency ac voltage measurement system using single-junction thermal converter」	H24. 3
	平成 24 年度電気学会全国大会講演論文集 「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講演論文集 「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講演論文集 「薄膜型サーマルコンバータの耐環境性の評価」	H24. 3
	Proceedings of CPEM2012 digest 「Thin-film multijunction thermal current converter with increased rated current level」	H24. 7
	Proceedings of CPEM2012 digest 「Uncertainty estimations of an evaluation system for a high accuracy and wideband transconductance amplifier」	H24. 7

	Proceedings of CPEM2012 digest 「Sampling measurement using a programmable Josephson voltage standard system toward low-frequency ac voltage standard」	H24.7
	Proceedings of CPEM2012 digest 「Numerical and experimental investigations of low-frequency properties of single-junction thermal converter」	H24.7
	IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING 「Numerical analysis of low-frequency properties in single-junction thermal converters」	H24.7
	第73回応用物理学会学術講演会予稿集「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講演論文集「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
	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」	H24.11
	IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING 「Multijunction thermal converter with improved frequency characteristics between 10 Hz to 1 MHz」	H24.11
	IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT 「Development of thin-film multijunction thermal current converters with increased rated current」 in press	H25.3
	IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT 「Low-frequency characterization in a thermal converter using programmable Josephson voltage standard system」 in press	H25.3
	平成25年度電気学会全国大会講演論文集「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講演論文集「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
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 converter using meander Josephson junction arrays for quantum voltage standards」	H21.6
	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 (TCEM)「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
	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
	NMIJ 国際計量標準シンポジウム 「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
	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 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薄膜型サーマルコンバータの開発」	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
	NMIJ 2012 年度成果発表会 「電気複合量発生装置の開発」	H25. 1
	NMIJ 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/°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	達成

		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。	
課題1：薄膜型サーマルコンバータの開発	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。任意発生器でサーマルコンバータの交直差を参照として、出力は1V~10Vの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、1V~10Vの基準信号を出力するこ	達成

		とに成功した。	
課題2：複合量任意信号源回路の開発	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
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おいて 1 V のシャピロスステップを 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	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	達成

<p>課題3：小型ジョセフソン電圧標準の開発</p>	<p>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>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、出力チャン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>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。10mK以下の温度安定性と10K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10mK以上の温度変動を発生)を抑えるため、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、10mK</p>	<p>達成</p>

		以下の温度安定性を確認した。	
ジョセフソン電圧標準の開発	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 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
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10Vまでである。100V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、100V、50Hzで長期安定度100ppm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±10ppm、温度特性は3ppm/°C、長期安定度は65ppmを実現した。	達成

<p>課題4：電気標準信号発生システムの開発と評価</p>	<p>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。</p>	<p>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。</p>	<p>達成</p>
	<p>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、複数電流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。</p>	<p>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。</p>	<p>達成</p>

## 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かと予想される。

#### 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 年に実施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

### (1) 成果の高度化等に関する波及効果の事例

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

従来は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	産業技術総合研究所	<i>イントリック標準の開発</i>		
	ニッコーム株式会社	加速試験法の確立	劣化防止素子試作	耐久性能実証
複合量任意信号源回路の開発	株式会社SRT	素子設計と評価	測定精度の向上	
	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	DA変換器の評価	FPGA回路等製作
小型ジョセフソン電圧標準の開発	産業技術総合研究所	<i>基準信号発生装置の開発</i>		システム小型化
		12 K動作NbNジョセフソン素子の開発	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>イントリック標準の開発</i>		動作実証
	産業技術総合研究所	I-V変換回路・電圧増幅器の設計・動作解析	<i>アンプの開発</i>	
				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SRT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。

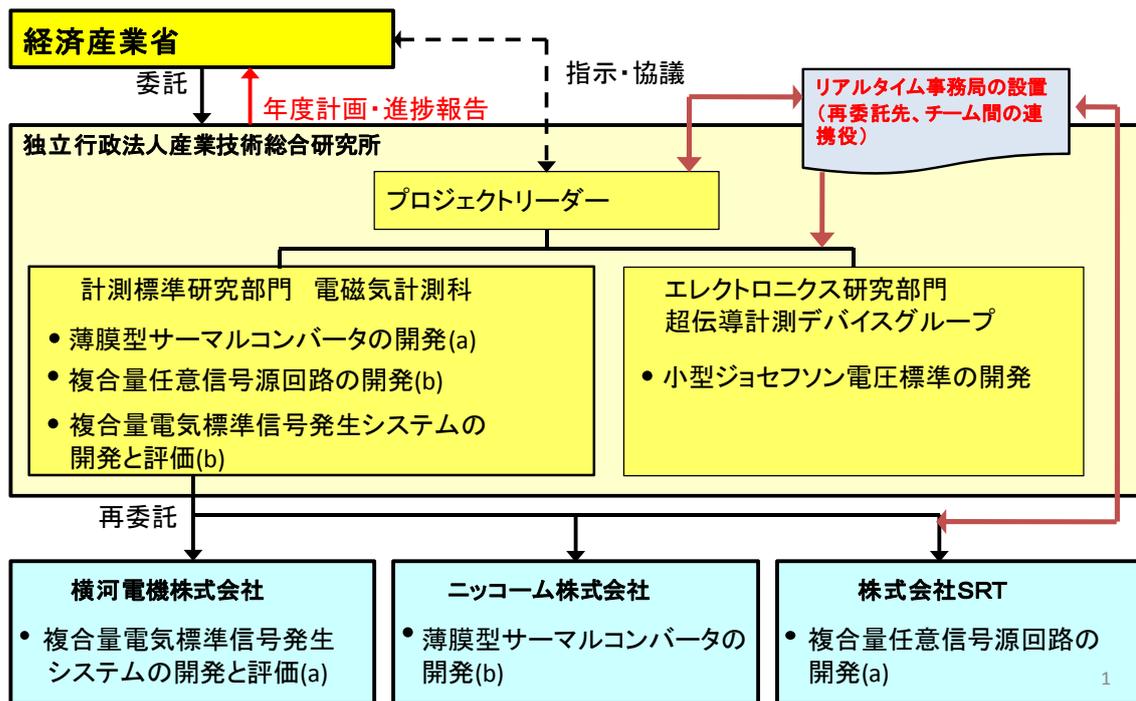


図 5-1. リアルタイム・キャリブレーション技術の研究開発の実施体制

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 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 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

	ループ	
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

### 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、1兆円×5%=500億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。