

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「制御ソフトウェアの高度化による
産業用超高安定度電圧標準装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成25年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 公益財団法人長野県テクノ財団

目次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-1-1 研究の背景	1
1-1-2 研究概要	1
1-1-3 研究目的	2
1-1-4 研究目標	2
1-2 研究体制	3
1-2-1 研究組織（全体）	3
1-2-2 管理体制	4
1-2-3 管理員及び研究員	5
1-2-4 指導・協力者及びその内容	5
1-2-5 研究実施場所	5
1-3 成果概要	6
1-3-1 [課題1] 組込みソフトウェアの高度化	6
1-3-2 [課題2] 制御ハードウェアの開発	6
1-3-3 [課題3] ハードウェアシミュレータの開発	6
1-3-4 [課題4] ジョセフソン素子作製技術の開発	7
1-3-5 [課題5] 装置の安定度及び操作性の評価	7
1-4 該当プロジェクトの連絡窓口	7
第2章 研究開発の内容と成果	8
2-1 [課題1] 組込みソフトウェアの高度化	8
2-1-1 組込みソフトウェア開発の概要	8
2-1-2 制御モジュール組込用ソフトウェアの改良	8
2-1-3 直流-交流変換モジュール用組込みソフトウェアの開発	9
2-1-4 装置本体用ソフトウェアの改良	10
2-1-5 高精度交流電圧発生用制御プログラムの開発	10
2-1-6 ソフトウェア信頼性の検証	12
2-1-7 まとめと今後の課題	13
2-2 [課題2] 制御ハードウェアの開発	14
2-2-1 制御モジュールの改良	14
2-2-2 クライオスタットの性能評価	15
2-2-3 精密直流-交流電圧変換回路	16
2-2-4 まとめと今後の課題	18
2-3 [課題3] ハードウェアシミュレータの開発	19
2-3-1 ハードウェアシミュレータ開発の目的	19
2-3-2 ハードウェアシミュレータ装置の改良	19
2-3-3 総合動作試験	19

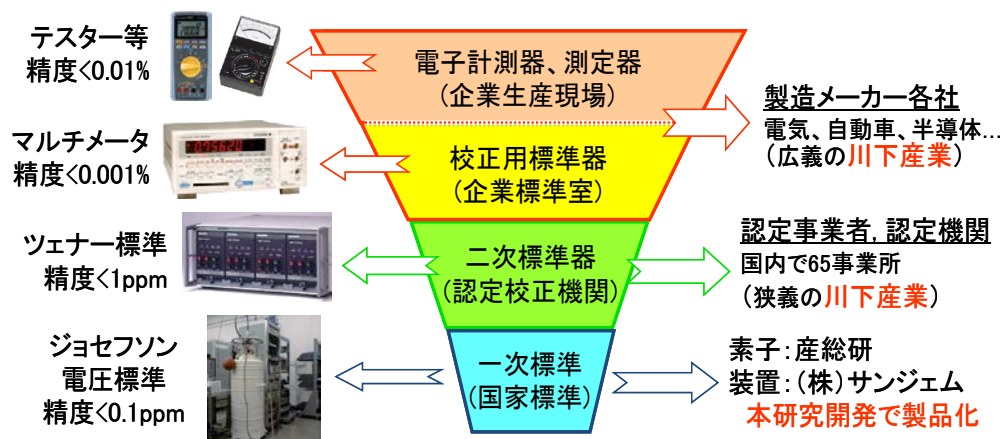
2-3-4	まとめ	22
2-4	[課題4] ジョセフソン素子作製技術の開発	23
2-4-1	チップの動作余裕度と接合バリア成膜母材の関係	23
2-4-2	ジョセフソン素子製作条件の最適化	24
2-4-3	ジョセフソン素子の作製歩留評価	28
2-4-4	まとめと今後の課題	30
2-5	[課題5] 装置の安定度及び操作性の評価	31
2-5-1	評価の目的と評価方法の概要	31
2-5-2	装置の電気的特性評価	31
2-5-3	装置の操作性評価	39
2-5-4	持ち回り試験の結果報告	40
2-5-5	まとめと今後の課題	43
第3章	全体総括	44
3-1	研究開発成果の総括	44
3-1-1	課題別成果	44
3-2	研究開発後の課題・事業化展開	45
3-2-1	製品化に向けて	45
3-2-2	国内への事業展開	45
3-2-3	海外への事業展開	45

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究の背景

電子計測器は、あらゆる工業製品の生産現場において、製品の品質を維持し、さらには向上させるために用いられる。この電子計測器の電圧測定精度を保証するために、下図のように、現場の計測器から校正用標準器、二次標準器(ツェナー標準)を介して標準研究機関の一次標準器(ジョセフソン電圧標準)へと、階層化された品質保証システムが構築されている。



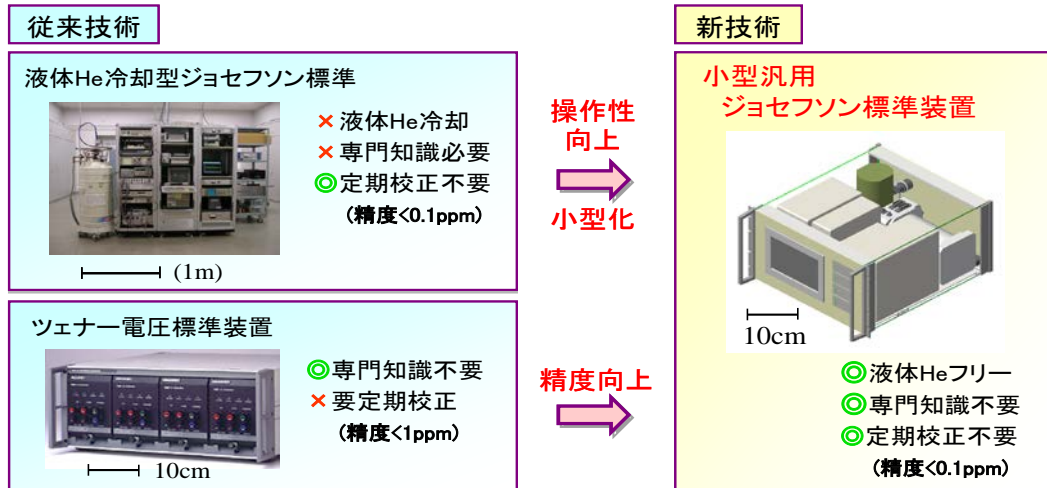
品質保証システム

ものづくり先進国を自負する日本では、世界的にトップレベルのジョセフソン電圧標準が実現されているものの、認定校正機関で使用される二次標準器の市場は、米国の計測器メーカーによって独占されており、肝心の品質保証に関しては外国製品に依存しているのが実情である。本研究開発においては、従来のツェナー標準と同等のサイズと価格で、格段に性能が高く、かつ操作性に優れた **PJVS** 装置を実現することにより、この状況を打破することを目的とする。

1-1-2 研究概要

定期的な校正が必要な従来型のツェナー電圧標準に対し、開発を行うジョセフソン電圧標準は、発生する電圧が原理的に経時変化しないという技術的優位性を有する。一方、ジョセフソン電圧標準には、磁束トラップや局所常伝導転移などの超伝導素子特有の障害があり、限られた専門家には扱えない難点がある。そこで、本研究開発

においては、専門家の知識やノウハウを用いて組込みソフトウェアを高度化することにより、様々な障害に対応し、かつ、信頼性が高く操作性に優れた PJVS 装置の実現を目指す。



開発する PJVS 装置

1-1-3 研究目的

本研究開発の目的は、国家標準クラスの安定度（年率 0.01ppm 以下）及び生産現で非熟練者でも容易に使用可能な操作性を持つ、新しいカテゴリの電圧標準装置として、小型汎用ジョセフソン電圧標準装置を製品化することである。このような電圧標準装置は、電子計測器の品質保証システムの根幹を担うため、その制御に用いられる組込みソフトウェア自身の信頼性も重要なものとなる。そのため、組込みソフトウェアの検証・品質保証体系への適合性に配慮し、透明性が高く検証が容易な組込みソフトウェアを開発するとともに、信頼性の高い検証手法を開発する。

1-1-4 研究目標

標記研究目的を効率良く達成するため、全体を 5つの研究課題に分割するとともに、お互いの連携により研究開発を遂行する。各課題目標を記す。

① 組込みソフトウェアの高度化

(実施：株式会社サンジェム、独立行政法人産業技術総合研究所)

- ①-1 制御モジュール用組込みソフトウェアの開発
- ①-2 電圧標準装置本体用組込みソフトウェアの開発
- ①-3 組込みソフトウェアの信頼性設計と評価

② 制御用ハードウェアの開発

(実施：株式会社サンジェム)

②-1 電圧標準装置本体用ハードウェアの開発

②-2 精密直流-交流電圧発生装置の開発

③ ハードウェアシミュレータの開発

(実施：デンソクテクノ株式会社)

ジョセフソン電圧標準装置用ハードウェアシミュレータとしての応答時間 10ms を実現する。

④ ジョセフソン素子作製技術の開発

(実施：独立行政法人産業技術総合研究所)

絶対温度 12K で安定に動作し、かつ、環境雑音への耐性に優れたジョセフソン素子を実現する。

⑤ 装置の安定度及び操作性の評価

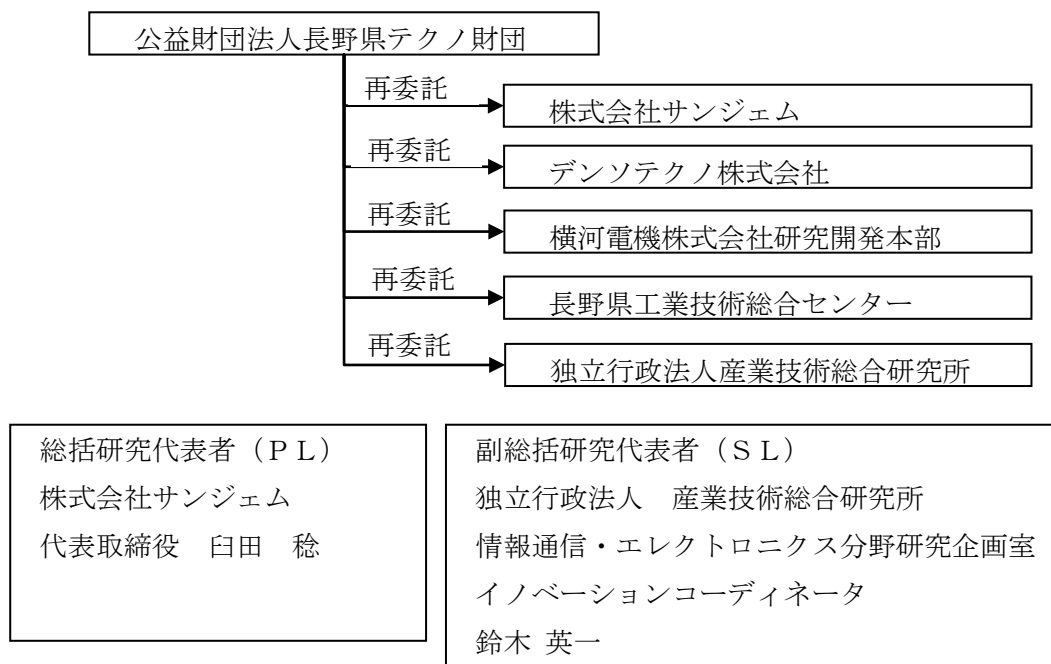
(実施：長野県工業技術総合センター、横河電機株式会社、独立行政法人産業技術総合研究所)

⑤-1 装置の長期安定度の評価

⑤-2 装置の操作性及び信頼性の評価

1-2 研究体制

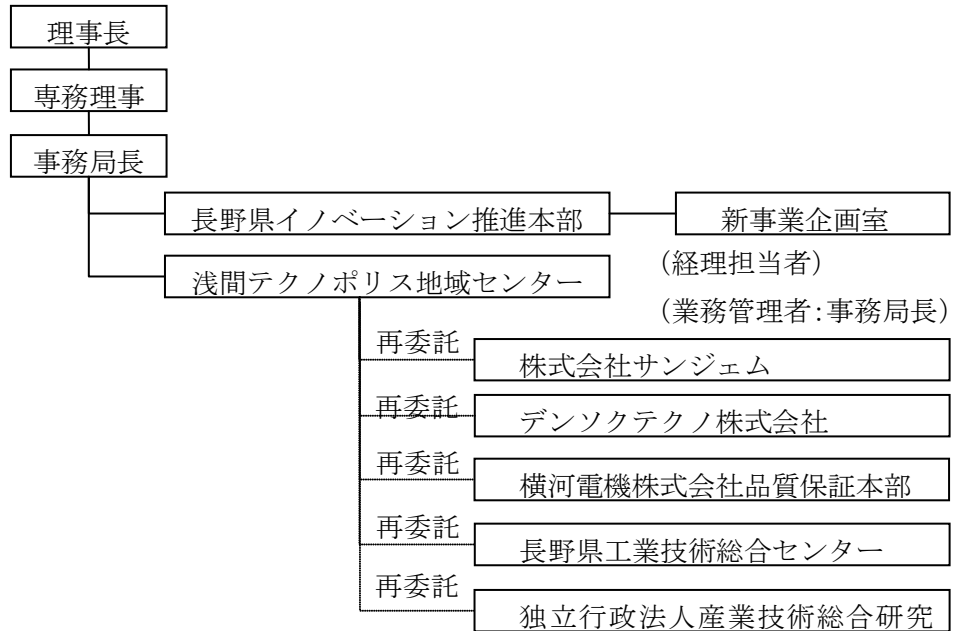
1-2-1 研究組織 (全体)



1-2-2 管理体制

(1) 事業管理機関

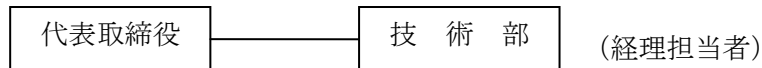
[公益財団法人長野県テクノ財団]



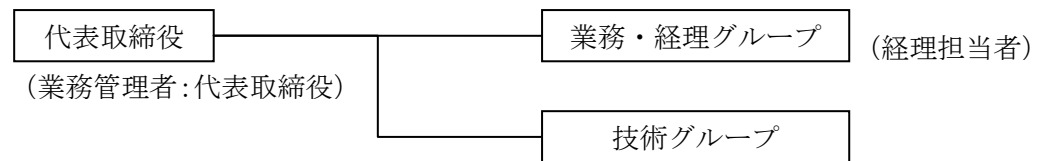
(2) 再委託先

[株式会社サンジェム]

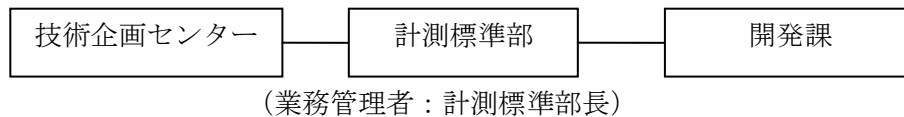
(業務管理者:取締役技術担当)



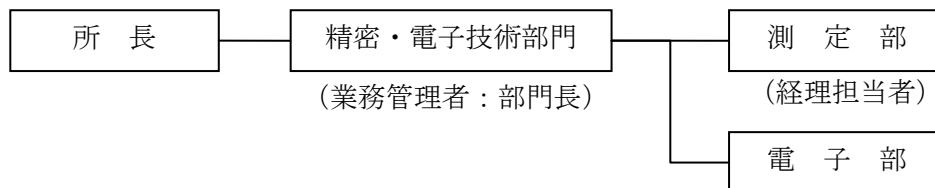
[デンソクテクノ株式会社]



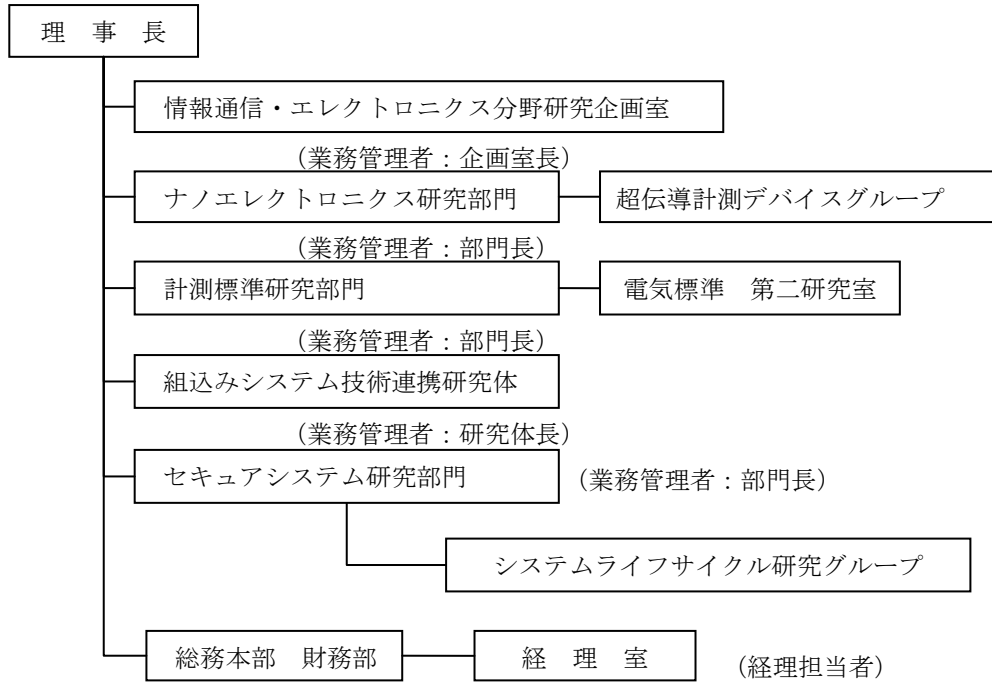
[横河電機株式会社研究開発本部]



[長野県工業技術総合センター]



[独立行政法人産業技術総合研究所]



1-2-3 管理員及び研究員

【事業管理機関】

公益財団法人長野県テクノ財団（管理員）

【再委託先】（研究員）

株式会社サンジェム、デンソクテクノ株式会社、横河電機株式会社
 長野県工業技術総合センター、独立行政法人産業技術総合研究所

1-2-4 指導・協力者及びその内容

日本電気計器検定所 技術研究所

1-2-5 研究実施場所

株式会社サンジェム	長野県佐久市田口 4731
デンソクテクノ株式会社	東京都大田区東糀谷六丁目 4 番 17 号
横河電機株式会社	山梨県甲府市高室町 155
長野県工業技術総合センター	長野県岡谷市長地片間町 1 丁目 3 番 1 号
独立行政法人 産業技術総合研究所	茨城県つくば市梅園 1-1-1 産業技術総合研究所中央第二事業所

1-3 成果概要

以下の報告において、ジョセフソン電圧標準装置を PJVS 装置と記し、初年度(H23 年度)に製作したジョセフソン電圧標準装置をサポイン 1 号機、H24 年度に製作した交流電圧発生機能を付加した改良型ジョセフソン電圧標準装置をサポイン 2 号機と記す。

1-3-1 [課題 1] 組込みソフトウェアの高度化

課題[1]においては、産業技術総合研究所および株式会社サンジェムが協力して担当し、専門知識を持たないユーザーでも使用可能な PJVS 装置を実現するために、組込みソフトウェア技術の高度化研究を下記 3 項目のサブテーマに分けて実施した。

(1) 制御モジュール用組込みソフトウェアの開発

巡回評価結果の結果に基づいて、信頼性向上のための改良を実施した。また直流-交流変換モジュール用の組込マイクロコントローラのプログラムを開発した。

(2) 電圧標準装置本体用組込みソフトウェアの開発

巡回評価結果およびモデル検査の結果に基づいて、信頼性および操作性向上のための改良を実施した。また直流-交流変換モジュールを外部から制御して高精度の交流電圧を発生させるための制御プログラムを開発した。

(3) 組込みソフトウェアの信頼性設計と評価

モデル検査を本体用組込みソフトウェアに適用し、各種障害の自動検出と復旧動作についての仕様及び設計の検証を行った。

1-3-2 [課題 2] 制御ハードウェアの開発

課題[2]は、株式会社サンジェムおよび産業技術総合研究所が協力して担当し、平成 24 年度においては、サポイン 1 号機に対する評価試験の結果に基づく改良と、サポイン 2 号機の開発を行った。

1-3-3 [課題 3] ハードウェアシミュレータの開発

課題[3]は、デンソクテクノ株式会社が担当し産業技術総合研究所および日本電気計器検定所の協力を得て、同社の有する精密計測回路技術と組込みソフトウェア技術を用いて、超伝導ジョセフソン素子を半導体回路で擬似的に実現することが可能な、PJVS 装置用ハードウェアシミュレータ装置を開発した。

1-3-4 [課題4] ジョセフソン素子作製技術の開発

課題[4]は産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門が担当し、ジョセフソン接合素子製作上の下記事項に関する検討を行った。

① チップの動作余裕度と接合バリア成膜母材の関係

② ジョセフソン素子製作条件の最適化

(1) パーティクル低減法の確立

(2) エッチング終点検出の導入

③ ジョセフソン素子の作製歩留評価

その結果、①および②により、動作範囲の広いチップを安定的に作製することが可能になり、③により、温度 $12 \pm 0.5\text{K}$ 、マイクロ波電力 $200 \pm 30 \text{ mW}$ の範囲で、約 1mA 程度の電流マージンを示したチップを作製できた。これにより、耐環境雑音性に優れたジョセフソン素子作製の見通しを得た。

1-3-5 [課題5] 装置の安定度及び操作性の評価

課題[5]においては、ユーザインターフェースを評価するため長野県工業技術総合センターの電気計測研究会会員に実際に操作を体験していただき、使用者側の観点からの意見・感想により PJVS 装置のユーザインターフェースを改良した。また PJVS 装置を、長野県工業技術総合センターにおいて電气的特性評価し、製品化するためにはまだ改善・改良が必要な部分が少なからずあるものの、非常に優れた性能を持っていることがわかった。そして今後の装置の改良方針を明確にすることができた。

1-4 該当プロジェクトの連絡窓口

事業管理者	公益財団法人長野県テクノ財団
代表者	理事長 市川 浩一郎
所在地	〒386-8567 長野県長野市若里 1-18-1 長野県工業技術総合センター内 3階
担当者	浅間テクノポリス地域センター コーディネータ 湯浅 正樹 ma-yuasa@tech.or.jp コーディネータ 小野 正明 ma-ono@tech.or.jp
所在地	〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1 (信州大学繊維学部内)
連絡先	TEL : 0 2 6 8 - 2 3 - 6 7 8 8 FAX : 0 2 6 8 - 2 3 - 6 6 7 3

第2章 研究開発の内容と成果

2-1 [課題1] 組み込みソフトウェアの高度化

2-1-1 組み込みソフトウェア開発の概要

本研究の目的は、組み込みソフトウェア技術の高度化によって、専門知識を持たないユーザーでも使用可能な PJVS 装置を実現することである。また、高精度交流電圧発生機能を有する装置(以下直流-交流変換モジュールと記す)を制御するためのソフトウェアの開発も新たに研究目的に追加した。これらの目的を実現するために、下記の3項目のサブテーマに分けて実施した。

- (1) 制御モジュール用組み込みソフトウェアの開発：巡回評価結果の結果に基づいて、信頼性向上のための改良を実施する。また直流-交流変換モジュール用の組込マイクロコントローラのプログラムを開発する。
- (2) 電圧標準装置本体用組み込みソフトウェアの開発：巡回評価結果およびモデル検査の結果に基づいて、信頼性および操作性向上のための改良を実施する。また直流-交流変換モジュールを外部から制御して高精度の交流電圧を発生させるための制御プログラムを開発する。
- (3) 組み込みソフトウェアの信頼性設計と評価：モデル検査を本体用組み込みソフトウェアに適用し、各種障害の自動検出と復旧動作についての仕様及び設計の検証を行う。

2-1-2 制御モジュール組込用ソフトウェアの改良

モジュール制御用組み込みソフトウェアは、各制御モジュール内の USB インターフェイスモジュール(UPM-02)に搭載されたマイクロコントローラ (PIC16F877)に書き込まれるもので、前年度に評価試験およびソフトウェア検証を完了している。本年度は、各制御モジュールのハードウェア改良に対応させるために、(1)電圧増倍回路電源のフロート化への対応および USB-I/F 基板のノイズ対策への対応を行った。

まず、電圧増倍回路電源のフロート化においては、昨年度の評価結果に基づき、電圧増倍回路の出力電圧のノイズレベルの低減のため、新たに 10 チャネルのフロート電源が追加された。このハードウェア変更に伴い、従来のアナログ用電源との切り換えを制御するために、PIC プログラムに"FLT"コマンド対応用のサブルーチンを追加した。

次に、USB-I/F 基板のノイズ対策への対応においては、USB-I/F 基板のクロックを独立した 20MHz の水晶振動子で動作させるハードウェア変更に対応して、PIC プログラムでは電圧増倍回路の DAC 回路用電源設定およびシリアル通信用の動作周波数の宣言値を変更した。

2-1-3 直流-交流変換モジュール用組み込みソフトウェアの開発

本年度に新たに開発した精密直流-交流電圧変換回路は、課題[2]の報告で詳しく述べる様に、DSS モジュール、AMP(X)モジュール、AMP(S)モジュールより構成されている。また、これらのモジュールの制御を統一的行うために、モジュールへ電源供給と USB-I/F が一体となった USB/PS モジュールが設置されている。本節においては、この USB/PS モジュールのデジタル回路に搭載されたマイクロコントローラ(PIC16F877A)用の制御プログラムの概要を記述する。

新たに開発した PIC プログラムのコマンドリストを表 2-1-1 に示す。コマンドは、全てのモジュールに共通するコマンド、DSS モジュール制御コマンド、AMP(X/S)モジュール制御用コマンド、およびリレー制御用コマンドの 4 種類にグループ分けすることができる。

共通コマンドとしては、モジュールの型式と個体番号を識別するための"IDNT"コマンド、各モジュールのアナログ電源の ON-OFF を制御するための"PWON"コマンド、各モジュールの初期化を行うための"INIT"の 3 種類のコマンドを用いる。またリレーの切り替えを行うためのコマンドとして"RELAY"コマンドが用いられる。

New Command			
Name	Init	Parameter	Responce
IDNT	ID	(None)	"ACDCv1.0"
PWON(Setting)	PW	"0" or "1"	OK
INIT	IN	(None)	"50Hz" or "60Hz"
MODE(Mode)	MO	"0" to "4"	OK
OUTPUT(Setting)	OU	"0" or "1"	OK
ACADJ(Setting)	AC	"0" to "FFF"	OK
DCADJ(Setting)	DC	"0" to "FFF"	OK
FREQ(Setting:32bit)	FR	"0" to "FFFFFFFF"	OK
CKOFS(Wtime)	CK	"0" to "FFF"	"PLUS" or "MINUS"
AJOFS(Setting)	AJ	"0" to "FFF"	OK
XGAIN(Setting)	XG	"0"(2 ⁰) to "6"(2 ⁶)	OK
XREAD	XR	(None)	"0" to "FFFFFF"
XBKUP(Setting)	XB	"0" to "FFF"	OK
SGAIN(Setting)	SG	"0"(2 ⁰) to "6"(2 ⁶)	OK
SREAD	SR	(None)	"0" to "FFFFFF"
SBKUP(Setting)	SB	"0" to "FFF"	OK
RELAY(On/Off)	RE	"0"(NOR) or "1"(REV)	OK

表 2-1-1 精密直流-交流電圧変換回路制御プログラムのコマンドリスト

DSS モジュール制御用コマンドとしては、出力モード(OFF/AC/DC+/DC-)を選択するための" MODE "コマンド、出力レベルを設定するための"OUTPUT"コマンド、出力電圧の微調整を行うための" ACADJ/DCADJ"コマンド、AC 出力時の周波数を設定するための" FREQ"コマンド、AC 出力時の直流オフセットを検出/制御するための"CKOFS/AJOFS"の 7 種類のコマンドが用いられる。また AMP(X/S)モジュール制御用コマンドとしては、

各モジュールに搭載された AD コンバータの入力ゲインを設定するための"XGAIN／SGAIN"コマンド、各モジュールの AD コンバータの測定値を読み出すための"XREAD／SREAD"コマンド、各モジュールに搭載されたオフセット補償用 DA コンバータの設定を行うための"XBKUP／SBKUP"の 3 種類のコマンドが用いられる。

2-1-4 装置本体用ソフトウェアの改良

装置本体用組込みソフトウェアは、前年度(H23)までに、産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス研究部門において開発された制御プログラムをベースとして、ほぼ完成した形で開発されている。本年度においては、主に小型 PJVS 装置本体のハードウェアの改良への対応およびメンテナンスの容易性向上を目的として、主に (1) ソフトウェア保守作業への対応、(2) ハードウェア変更(IF パネル PC への変更)に対応、(3) 冷凍機の冷凍能力の変動への対応を行った。

まず、ソフトウェア保守作業への対応においては、発初期に用いた Visual Basic 6.0 固有のコードの排除と参照コンポーネントの整理を行い、Visual Basic 2010 および Windows 7 での正常動作が確認した。次に、ハードウェア変更への対応においては、10 インチパネル PC への変更に伴うソフトウェアの修正を行った。一方、本年度サポイン 2 号機用に製作したクライオスタットにおいて、冷凍能力の顕著な変動が見られたため、熱負荷変動の主要な原因であるマイクロ波パワーの ON-OFF 制御シーケンスの変更を行った。

上記のプログラムの改良の他、課題[5]の評価結果に対応して、(a) 精密測定シーケンス時の"Proceed"ボタン操作の利用、(b) Josephson 素子の直接出力を制御するための操作ウィンドウの新設、(c) 動作マージンの大きな Josephson 素子アレーを優先的に使用するオプションの付加など、操作性向上のための変更を実施した。

2-1-5 高精度交流電圧発生用制御プログラムの開発

前節で述べた様に、本年度に新たに開発した精密直流-交流電圧変換回路は、DSS モジュール、AMP(X)モジュール、AMP(S)モジュールおよび USB/PS モジュールから構成されている。本節においては、この精密直流-交流電圧変換回路と小型ジョセフソン電圧標準装置とを組み合わせ、高精度交流電圧発生装置として機能させるための制御プログラムについて記述する。

制御プログラムの基幹部分のフローチャートを図 2-1-1 に示す。この制御フローは、校正済みのサーマルコンバータを用いて市販の Fluke5790 等の精密交流電圧測定装置の校正を行う場合を想定し、一般的な交直流比較測定のアアルゴリズムに基づいて設計されている。本計測プログラムの動作について下記に詳細を述べる。

まず測定開始後、最初に DSS モジュール、AMP(X)モジュール、AMP(S)モジュールおよび切り替えリレーの初期化が行われて、入力待ち状態となる。ここで、発生させる交流電圧

の値と周波数を入力すると、"Home A"ポジションに移行して待機状態となる。

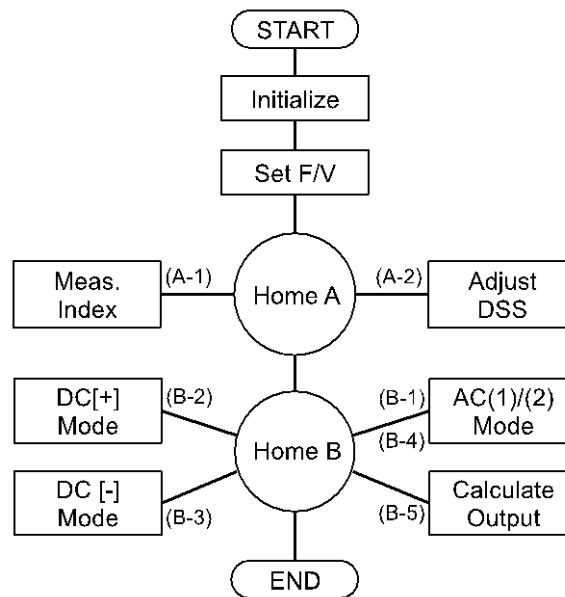


図 2-1-1 制御プログラムのフローチャート

"Home A"では、交直流比較測定の測定シーケンスの準備段階として、サーマルコンバータの感度係数(Sensitivity Index)を測定し、さらに DSS モジュールの発生する直流電圧を基準として、同モジュールの発生する交流電圧出力を調整する。将来的にはジョセフソン電圧標準装置の発生電圧を基準にして、DSS モジュールの直流電圧の調整も行う予定である。これらの、測定を完了した後、"Home B"ポジションに移行して待機状態となる。"Home B"では、実際に交直流比較測定の測定シーケンスを実行する。実際の測定シーケンスは、サーマルコンバータ出力の温度ドリフトの影響を避けるために、[1] 交流電圧出力モード、[2] 直流正電圧出力モード、[3] 直流負電圧出力モード、[4] 交流電圧出力モードの順番で実行される。

直流出力モードでは、まず DSS の直流出力電圧の設定を行った後に、"Mode"コマンドで正極性出力モード"DC+ Mode"または負極性出力モード"DC- Mode"に設定する。その後切り替えリレーを"ON/Connect"モードにして AMP(X)モジュールで DSS 出力電圧 $V_{DSS}(\pm)$ と PJVS 出力電圧 $V_{PJVS}(\pm)$ の差 $\Delta V(\pm)$ を測定する。同時に AMP(S)モジュールで、サーマルコンバータの出力電圧 $E_{TVC}(\pm)$ を測定する。これらの読み値を画面上に表示するとともに、データファイルに出力する。

次に、交流出力モードでは、交流出力電圧の設定を行った後に、"Mode"コマンドで交流出力モード"AC Mode"に設定する。その後切り替えリレーを"OFF/Open"モードにして、DSS 出力を AMP(X)モジュールおよび PJVS 装置から切り離す。この状態で PJVS 装置の校正モードを実行して、電圧増倍回路出力をジョセフソン素子アレー出力により校正する。同時に AMP(S)モジュールで、交流入力時のサーマルコンバータの出力電圧 $E_{TVC}(\sim)$ を測定し、測定値を画面上に表示するとともに、データファイルに出力する。

この交直流比較測定を実行するための制御ウィンドウを図 2-1-2 に示す。一連の測定シーケンス完了後に、電圧出力プローブの N 型端子から出力された直流電圧および交流電圧の実効値が計算されて、このウィンドウに表示される。

この制御ウィンドウを用い、プロンプトに従って交流電圧の設定値を入力して、"Proceed" ボタンを押して測定を進めて行くだけで、PJVS 装置により校正された交流電圧の発生が可能となる。発生された直流電圧と交流電圧の差は約 1 μ V (0.1ppm)であり、測定感度の 0.5ppm 以下で一致する結果が得られている。

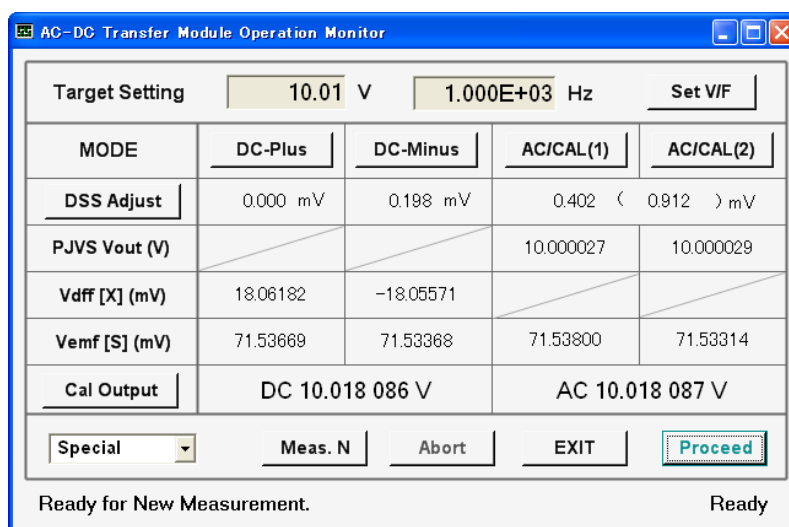


図 2-1-2 交直流比較測定の制御画面

2-1-6 ソフトウェア信頼性の検証

本サブテーマにおける研究課題として、最新の検証手法であるモデル検査を電圧標準装置本体用組込みソフトウェアに適用し、各種障害の自動検出と復旧動作について、仕様及び設計をモデル検査で検証した。モデルは専用言語でコーディングするため、一般的なプログラミング言語と同様に、コーディング対象となる変数を抽出し、状態遷移表や状態遷移図などを用いて設計を行う必要がある。本サブテーマでは、状態遷移表を用いた設計を行った。表 2-1-2 及び表 2-1-3 に、電圧標準装置本体用組込みソフトウェアの変数の一例及び状態遷移表の一例を示す。

表 2-1-2 PJVS 本体用組込みソフトウェアの変数の一例

NO	名称	型	初期値	値
1	OPTN	Symbol	emp	emp, Special, Normal
2	CalOutCNTL	Symbol	emp	emp, EXEC, Closed
3	RFsweepCNTL	Symbol	OFF	OFF, ON
4	OptimizeCNTL	Symbol	emp	emp, EXEC, ABORT, OK

表 2-1-3 PJVS 本体用組込みソフトウェアの状態遷移表の一例

NO	遷移条件	遷移後の値
1	frmStepCheck1_frmStepCheck_Load = 1	EXEC
2	frmStepCheck1_Command_EXEC_B = 1 & frmStepCheck1_Command_EXEC = EXEC	ABORT
3	frmStepCheck1_Command_EXEC_B = 1 & !(frmStepCheck1_Command_EXEC = EXEC)	WAIT

状態遷移表に基づいてモデルをコーディングし、時相論理式「 $AG(P \rightarrow AF(Q))$ 」(イベント P が発生した場合に、その応答である Q が必ず起こること)を用いてシステムの正常動作を検査した。本サブテーマのモデル検査では、合計 292 式について検査を実施し、全ての検査結果が「TRUE (正しい)」であり、システムの動作が、設計通りであることを確認した。

2-1-7 まとめと今後の課題

本課題[1]においては、専門知識を持たないユーザーでも使用可能な PJVS 装置を実現するために、組込みソフトウェア技術の高度化研究を、(1)制御モジュール用組込みソフトウェアの開発、(2)PJVS 装置本体用組込みソフトウェアの開発、(3)組込みソフトウェアの信頼性設計と評価の 3 項目のサブテーマに分けて実施した。

制御モジュール用組込みソフトウェアの開発においては、課題[5]において行われた巡回評価結果の結果に基づいて、信頼性向上のための改良を実施した。また直流-交流変換モジュールの組込マイクロコントローラ用のプログラムを完成させ、その動作確認を行った。

同じく PJVS 装置本体用組込みソフトウェアの研究開発においては、同じく巡回評価結果に基づいて、信頼性および操作性向上のための改良を実施するとともに、直流-交流変換モジュールを外部から制御して高精度の交流電圧を発生させるための制御プログラムを完成させて、その動作確認を行った。

一方、組込みソフトウェアの信頼性設計と評価においては、本体 PC 組込用ソフトウェアに対して、最新の検証手法であるモデル検査を適用して検証を実施し、設計仕様と実際の動作の整合性を確認した。

以上の結果、課題[1]の研究開発においては本年度の目標を達成した。今後、より操作性が良くかつ信頼性の高いシステムを実現するために、ハードウェア、ソフトウェアの両面から改良を継続して行なって行く予定である。

2-2 [課題 2] 制御ハードウェアの開発

2-2-1 制御モジュールの改良

本節では、各制御回路系(温度制御モジュール、バイアス電流モジュール、マイクロ波モジュール、電圧増倍回路モジュール、制御装置本体)の改良設計と結果を示す。

(1) 電圧増倍回路モジュールの改良

① USB-I/F 基板のノイズ対策：出力電圧に USB インターフェイス由来の 12MHz のクロックノイズが重畳していた。USB-I/F 基板のマイクロコンピュータ用クロックを USB-シリアルコンバータ IC の内部発振回路からではなく、独立した 20MHz の水晶振動子で動作させることでノイズを検出感度以下に低減させた。

② フロート電源基板の追加：出力電圧のノイズレベルの低減と、ノイズ源の特定及び切り離しの目的でフロート電源を追加した。電源回路には電気二重層コンデンサを使用しており、最大 3 分程度の駆動が可能である。フロート電源は、従来のアナログ用電源と DAC 回路の間に挿入される。従来のアナログ用電源との切り換えは、PC からのコマンドでリレーを駆動して行う。図 2-2-1 にフロート電源の回路図を示す。バックアップ回路は全て同一回路構成であるために、10 回路中の 2 回路のみを表示している。

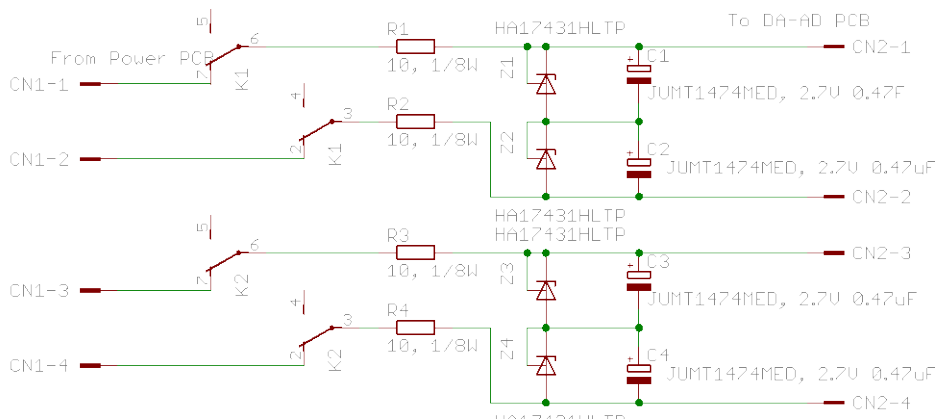


図 2-2-1 フロート電源回路図(10 回路中 2 回路)

③ 電源回路ノイズ低減対策：電源回路において、電圧増倍回路用の電源とデジタル制御回路が同一の電源シールドケース内に納まっており、ケース内でデジタルノイズが伝搬する可能性があった。そのため、シールドケースを縮小して電圧増倍回路用の電源はシールドの外に移設した。

(2) 温度制御モジュールの改良

フィードバック電流の発振防止対策：フィードバック電流が最大電流に近付くと、発振状

態となり温度センサーの読み取りエラーが発生し制御ソフトウェアの誤動作の原因となっていた。対策として、FETをトランジスタ(2SC3748R)に交換し、交換に伴いトランジスタのベースに電流制限抵抗を追加するとともに、制御電圧の分圧比を変更して最大出力電流を1/2に抑制した。

(3) 制御装置本体の改良

サポイン1号機は8インチのパネルPCを用いたが、巡回評価等において評価者から視認性および操作性に問題があるとの指摘があった。そこで、サポイン2号機では、ラックマウント可能な筐体サイズに収容可能で最大の大きさの、10インチパネルPCを採用した。また、このパネルPCの特長である強制リセット機能を用いて、制御プログラム終了時に自動シャットダウンを行うための回路を追加した。

2-2-2 クライオスタットの性能評価

サポイン2号機用に製作したクライオスタットにおいては、サポイン1号機用のクライオスタットとほぼ同一の構造を有しているにも関わらず、PJVS素子を動作させるための温度領域1.1K~1.2Kへの到達に時間がかかり、また到達後も数分の周期で冷凍能力の顕著な変動が見られた。また冷凍能力が低下した状態では、PJVS素子の発生する熱負荷により、素子の温度制御が不可能になる現象が頻発した。そこで、このサポイン2号機の冷凍能力不足の原因を調べるため、コールドヘッドの低温端部の温度を一定に制御するために必要なヒーター電力を、コールドヘッドの動的な冷凍能力として、毎秒1回のレートで、温度と共に記録した。

冷凍機を起動して約24時間後に測定を開始し、その後47時間にわたって自動測定を行った結果を図2-2-2に示す。図で横軸は時間単位の経過時間を示し、最小目盛は1時間に対応している。赤線は冷凍能力の変動をまた青線はコールドヘッド温度の変動にそれぞれ対応している。冷凍能力に対応する縦軸の単位はmWで、最小目盛は1mWに相当する。またコールドヘッド温度に対応する縦軸の単位は10mKで、最小目盛は10mKに相当している。なおコールドヘッドのディスプレイサ駆動用モーターの電源周波数(50Hzまたは60Hz)を緑色の線で表している。上側が60Hz、下側が50Hzに対応する。

測定結果から、冷凍能力およびコールドヘッド温度の変動は、大きく2つのパターンに別れ、10mK以上の振幅で、数分の周期で変動するモードと、2-3mK以内の振幅で比較的安定なモードが存在することが分かる。前者のモードは測定開始から16時間後まで観測され、11.5Kでの冷却能力が、ジョセフソン素子の発生する熱負荷約10mWを下回る時間が頻発している。一方、後者のモードでは、常に15mK以上の冷凍能力が得られるとともに、冷凍能力が安定化されている事に対応して、温度変動も±10mK程度以下に抑えられている。特に測定開始後30時間以降(起動後54時間以降)では、安定して20mKから25mK程度の冷凍能力が得られており、素子の安定冷却には全く問題のない状況となっている。

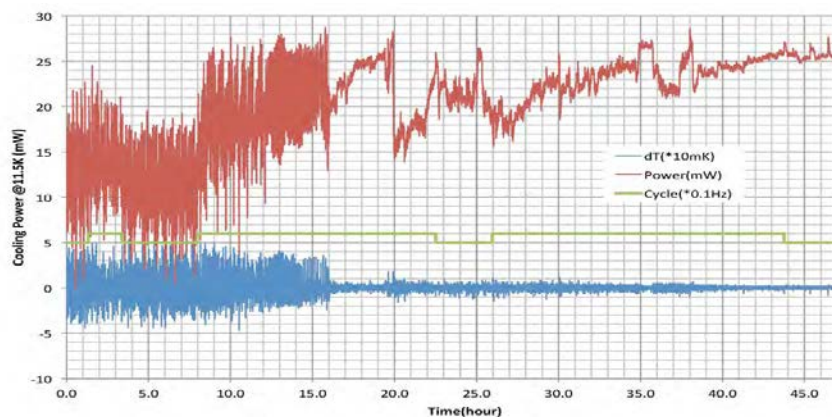


図 2-2-2 コールドヘッド温度変動

結果的には「原因不明だが時間が解決した」状態となっているが、今回の測定は、冷凍能力不足の問題が顕在化したサポイン2号機でしか行っておらず、また繰り返しの再現性も確認していない。PJVS 装置の製品化に向けての課題として、原因の解明は必須である。今後、(1)シールの不完全性やディスプレイサの偏心等に起因する冷凍機の個体差、(2)クライオスタット真空度の低下による断熱不良、(3)冷媒のヘリウムガスのコンタミネーション、(4)横置き運転の影響、(5)リード線の高温度部への接触等による熱負荷の変動、(6)差圧や流量等のコンプレッサの運転条件、(7)ディスプレイサの往復運動の周波数等の環境条件等の外部要因と発生条件との関係について、やや時間をかけて解明して行く必要がある。またコールドヘッドの運転音と発生条件の相関の有無についても調査を行うべきである。一方、温度測定の方法としては、今回行った方法に加え、コールドヘッド各部およびサプライ側およびリターン側の冷媒の温度等の温度分布の測定と、毎秒 20 サンプルング程度のサーマルシグナチャの測定を行って、これらの測定結果と発生条件との関連を調べる事が有効かもしれない。

2-2-3 精密直流-交流電圧変換回路

(1) 回路の構成

今回新たに開発した精密直流-交流電圧変換回路は、高精度のサーマルコンバータ（熱型交流変換素子）によって、直流電圧および交流電圧のパワーを熱に変換して精密に比較することにより、交流電圧の実効値を導出する。具体的には、小型 PJVS 装置が発生する高精度の直流電圧を基準として、新たに製作した精密直流-交流電圧変換装置の発生する安定した交流電圧とを、周波数特性の優れたサーマルコンバータ（ニッコーム製 JSTC06）で熱比較を行うことにより、10Hz～1MHz の周波数範囲において精密な交流電圧の発生を実現している。

開発した精密直流-交流電圧変換回路の具体的な筐体内部の構成を図 2-2-3 に示す。精密直流-交流電圧変換装置本体は、①各モジュールへ電源供給と USB-I/F が一体となった USB/PS モジュール、②精密な交直電圧を発生する DSS モジュール、③DSS モジュールの発生する直流電圧と PJVS 装置の発生する直流基準電圧の比較を行う AMP モジュール(X)、

④サーマルコンバータ出力電圧の精密な検出を行う AMP モジュール(S)、⑤PJVS 装置の発生する直流電圧を導入するためのリレー回路、⑥サーマルコンバータを内蔵した交流／直流電圧出力プローブより構成される。

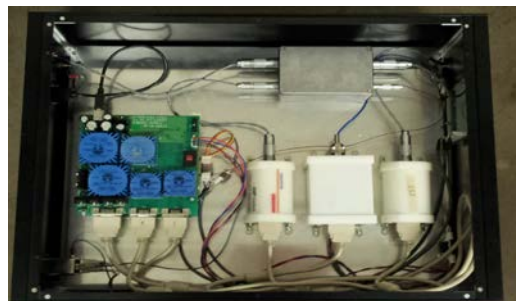


図 2-2-3 精密直流－交流電圧変換装置の内部構成

(2) 動作試験

精密直流－交流電圧変換装置と PJVS 装置本体を稼働させ、10V、1kHz での交流電圧の発生を試みた。本体は問題なく立ち上がり、自動デトラップおよび自動マージン測定機能が正常に働いて、最低温度に到達してから 1 時間程度で、10V の発生が可能な状態となった。

精密直流－交流電圧変換装置に内蔵された DSS モジュールの発生する 10V、1kHz の交流電圧をオシロスコープで記録した波形を図 2-2-4 に示す。同様にして 10Hz から 1MHz までの交流を発生させて、不具合なく波形が出力される事を確認した。また、PJVS 装置本体から電圧増倍回路を介して発生させた直流 10V と、直流－交流電圧変換装置の発生する 10V、1kHz の比較測定を行い、開発した直流－交流電圧変換装置が、目標である交流電圧発生精度 1ppm を達成するために必要十分な感度および安定度を有していることが確認できた。今後発生した交流電圧の精度の評価を早急に行う予定である。

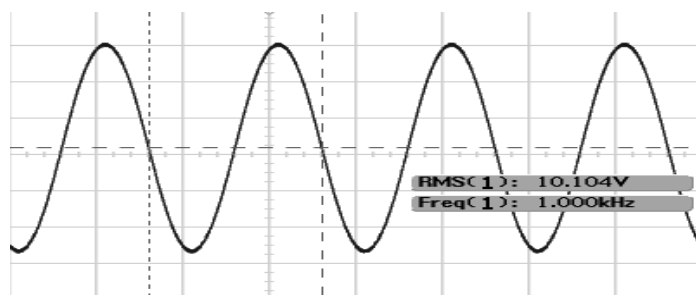


図 2-2-4 交流電圧波形(10V, 1k)

2-2-4 まとめと今後の課題

サポイン1号機の評価結果に基づいた改良を実施し装置の信頼性向上を図ることが出来た。また新たに精密直流-交流電圧発生装置を試作し、予備的な動作試験において開発目標である直流-交流変換精度 1ppm を達成できる見通しが得られた。今後の本装置の製品化に向けての課題としては、PJVS 装置本体については、電圧増倍回路の不安定性及び冷凍機の冷却能力不足の原因究明と対策を大至急行う必要がある。また電気安全規格に対応させるとともに、ノイズ対策（エミッション・イミュニティ）を積極的に進めて行く必要がある。さらに、新規に開発した精密直流-交流電圧発生装置においては、今後交流電圧の精度の確認を行って製品化に繋げて行く必要がある。

2-3 [課題3] ハードウェアシミュレータの開発

2-3-1 ハードウェアシミュレータ開発の目的

本開発において組込みソフトウェアの信頼性の確保が重要な課題となる。そこで、研究課題[3]として、PJVS 装置のハードウェアシミュレータの開発を実施した。その目的は、下記の通りである。

- (a) 制御ソフトウェアの開発ツールとして利用
 - 冷凍機を動かさずに、ソフトウェアの開発が可能。
 - 磁束トラップや局部常伝導転移の障害をシミュレート可能
- (b) 製品化後のメンテナンスツールとして利用
 - 冷凍機を動かさずに、制御モジュールの試験が可能。
 - 装置に不具合が生じた際に、顧客先での故障箇所の判断が可能。

2-3-2 ハードウェアシミュレータ装置の改良

PJVS 装置用ハードウェアシミュレータとして必要な応答時間 10ms を実現するため、エミュレーション・プログラムの開発・改良を行った。各内部パラメータの値を表示させるために新設したタッチパネル式 TFT カラー液晶表示器については、表示操作のために時間がかかり、繰り返し演算間隔が 10ms より長くなってしまいう事が判明したため、タッチパネル上に切り替えボタンを設置し、表示操作を行う低速モードと、表示操作を行わない高速モードを切り替えて使用する事とした。一方、高速 ADC の S/N 比が不十分なために、温度センサーの測定電流の計測ノイズにより温度計出力電圧にバラツキが生じる事が判明したため、ADC の出力値にデジタル積分操作を施すことにより、安定化させた。さらに、USB インターフェイス経由による制御コマンド等についても追加修正を行った。

2-3-3 総合動作試験

ハードウェアシミュレータの最終的な評価のため、PJVS 装置と組み合わせた総合動作試験を行い、ハードウェアシミュレータが有効に動作する事を確認した。

(1) 電圧出力部の改良

当初エミュレーション・プログラムの仕様の記述が不十分であったため、本来正負の出力電圧が発生するはずの PJVS 素子出力に相当する出力がマイナス出力に対応できない事が判明した。そのため、ゲイン x1 の通常出力で +/-2.5V まで、またゲイン x1000 の高分解能出力で +/-2.5mV まで、両極性の電圧が出力できる様な改良を行った。出力回路の具体的な改良部分

を図 2-3-4 に示す。なお、基準電圧のラインに 400kHz、100mV 程度の寄生発振が生じていたため、合わせて対策を講じた。

(2) ジョセフソン電圧標準装置との接続

ハードウェアシミュレータの総合動作試験を行うため、ジョセフソン素子を内蔵するクライオスタットに接続されている信号ケーブルを、全てハードウェアシミュレータに繋ぎ変えた。実際の接続の様子を示す写真を図 2-3-1 に示す。

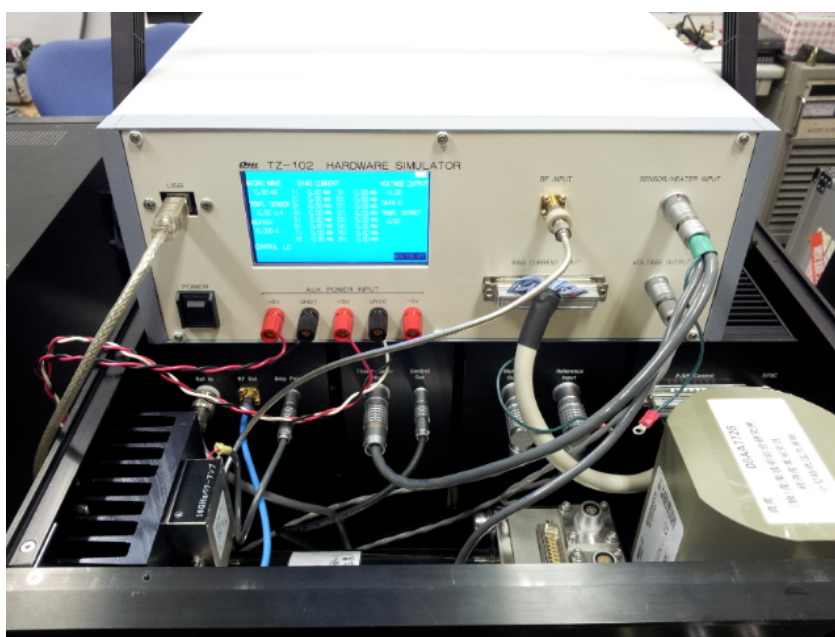


図 2-3-1 実際の接続の様子

(3) 動作試験の結果

ハードウェアシミュレータの総合動作試験においては、同一の PC を用いて、ジョセフソン電圧標準装置本体およびハードウェアシミュレータの制御を行った。制御時の PC のモニター画面を図 2-3-2 に示す。画面左側の部分には、通常のジョセフソン電圧標準装置本体制御用ウィンドウが表示されている。またその右側には、ジョセフソン素子アレーの電流-電圧特性を測定するためのウィンドウが表示されている。その下側に、今回開発したハードウェアシミュレータの制御を行うためのウィンドウが表示されている。このような測定・制御環境において、ハードウェアシミュレータの総合動作試験を行った。

まず、ハードウェアシミュレータの重要な機能である、コールドヘッドおよび素子周辺温度環境に対するエミュレーションを行った。ジョセフソン電圧標準装置本体制御用ウィンドウを用いて制御を行う限り、ハードウェアシミュレータの応答は実際のクライオスタットに非常に近く、定数等を調整する事なしに、フィードバックを用いた温度(疑似温度)の安定化を行う事ができた。通常の場合とは異なり、任意の温度を瞬時に実現できるメリットは大き

い。当然ながら、通常必要な4時間程度の冷却時間を待たずに、プログラムのデバッグ操作を行う事ができる。実際に、総合動作試験中にジョセフソン電圧標準装置本体制御用のプログラムの不具合が見つかったが、その場で修正して正常動作を確認でき、デバッグ用のツールとしても有効であることが示された。

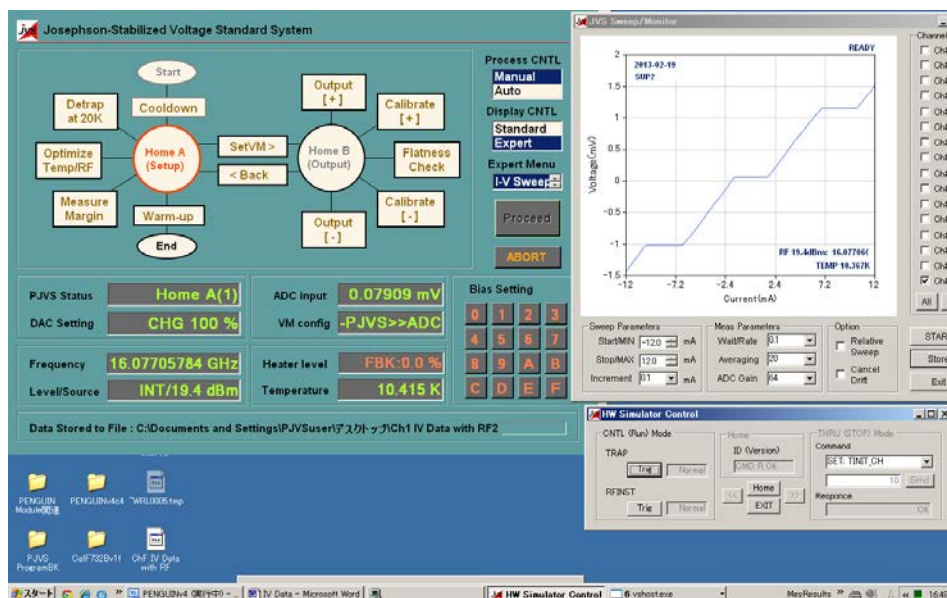


図 2-3-2 電圧出力部の改良

次に、ジョセフソン電圧標準装置本体制御用のプログラムの機能の一つとして搭載されている、ジョセフソン素子アレーの電流-電圧特性測定機能を用いて、ハードウェアシミュレータの動作試験を行った。ジョセフソン素子アレーの電流-電圧特性が正常に測定できるためには、ハードウェアシミュレータの各 A/D 変換入力回路、エミュレーション演算回路、および D/A 変換出力回路の全てが正常に機能する必要がある。逆に、これらに対応する、ジョセフソン電圧標準装置本体の各モジュール(温度制御モジュール、マイクロ波モジュール、バイアス電流モジュール、電圧増倍回路モジュール)の全てが正常に動作する必要があり、ハードウェアシミュレータが、ジョセフソン電圧標準装置本体のハードウェアをチェックするためのツールとしても極めて有効である事を示している。

仮想ジョセフソン素子アレーの電流-電圧特性測定(疑似測定)を行った結果を図 2-3-3 に示す。ジョセフソン素子アレーの LSB ビット(32 個)に対応するチャンネル#0 のバイアス電流を、 -12mA から $+12\text{mA}$ にスイープした。電圧出力回路のゲインの切り替え機能により、16bit の DA コンバータの分解能(約 5 桁、約 0.2mV)がさらに 3 桁改善されて、 1mV レンジでのスムーズな出力電圧変化が実現されていることが分かる。

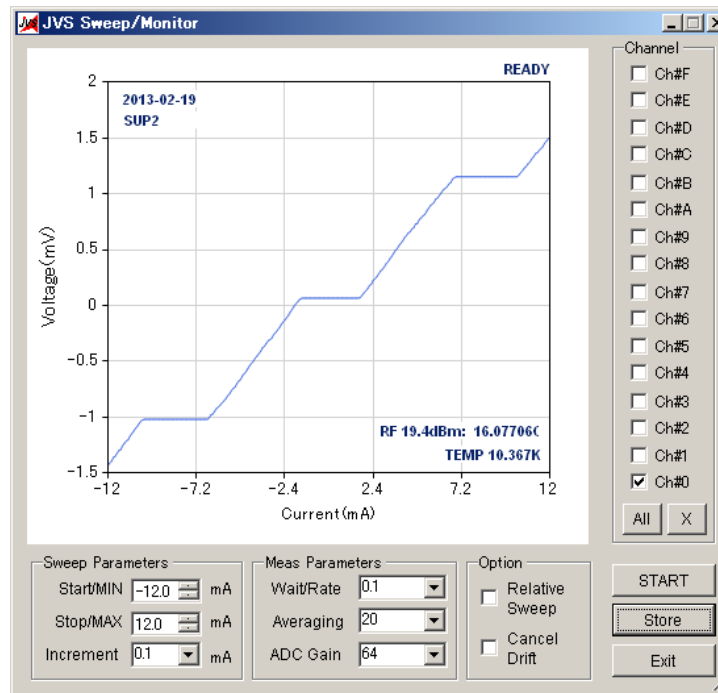


図 2-3-3 疑似電流-電圧特性(Channel#0))

2-3-4 まとめ

研究課題[3]として、PJVS装置のハードウェアシミュレータの開発を行った。開発はデンソクテクノ(株)が担当し、産業技術総合研究所および日本電気計器検定所が技術支援を行った。産業技術総合研究所ナノエレクトロニクス部門は、ハードウェアシミュレータの基本設計およびエミュレーションソフトウェアの開発に協力し、日本電気計器検定所技術研究所はハードウェアシミュレータの回路設計に関して技術支援を行った。

初年度の平成23年度には、ハードウェアシミュレータの入力-出力応答の部分の仕様設計およびPC上で動作する試験用エミュレータを作成し、ハードウェアシミュレータの入出力の基本動作を確認した。平成24年度には、引き続きエミュレーション・プログラムの改良を行うとともに、PJVS装置と組み合わせた動作確認を実施した。この結果、PJVS装置用ハードウェアシミュレータとして有効に動作する事、および応答時間10msでクライオスタットおよびジョセフソン素子アレーのエミュレーションが可能であることを確認した。また完成したハードウェアシミュレータを、実際にPJVS装置本体のハードウェアをチェックするためのツールとして、および制御用ソフトウェアのデバッグ用のツールとして使用し、当初の目的通りに有効に機能する事を確認した。

2-4 [課題4] ジョセフソン素子作製技術の開発

2-4-1 チップの動作余裕度と接合バリア成膜母材の関係

図2-4-1はジョセフソン接合のTiNバリアを反応性スパッタ法で成膜する際の概略図と、実際に使用している母材（Ti ターゲット）の写真である。Ti ターゲットを窒素プラズマで叩くことにより TiN 薄膜を反応性スパッタで作製する。Ti ターゲットを長年使用し消耗すると新品に交換する必要があるが、ターゲットにより作製したチップの動作範囲に差があることがわかった。



図 2-4-1 接合バリア成膜法の概略図と Ti ターゲットの実物写真

図 2-4-2 は新品の Ti ターゲットで作製したジョセフソン接合アレーで測定した 1 次シャピロステップの大きさのマイクロ波電流と温度の関係を示している。温度 12.0 ± 1.0 K の範囲でシャピロステップが得られていることがわかる。

一方、図 2-4-3 は長年使い込んだ Ti ターゲットで作製したジョセフソン接合アレーで測定した 1 次シャピロステップの大きさのマイクロ波電流と温度の関係を示している。先に示した図 2-4-2 よりも広い温度範囲 11.5 ± 1.5 K でシャピロステップが得られており、ステップの大きさも大きいことがわかる。原因は明らかではないが、古いターゲットの表面の方が見た目にも凹凸が大きく、窒素プラズマにさらされることにより窒化されていることが相違点として考えられる。新品のターゲットも慣らし運転（エイジング）で長年使用したターゲットの特性に近づく可能性もあるがこれについては検討する時間的余裕がなく、本プロジェクト期間中は素子作製を優先したため新品のターゲットの使用は中止した。ただし、長年使用したターゲットは消耗により残りの厚さが極わずかであり、近い将来、新品に交換する時期が訪れるので、ターゲット依存性がエイジング（慣らし運転）で改善されるのか、他に原因があるか、今後時間をかけて明らかにしていく必要がある。

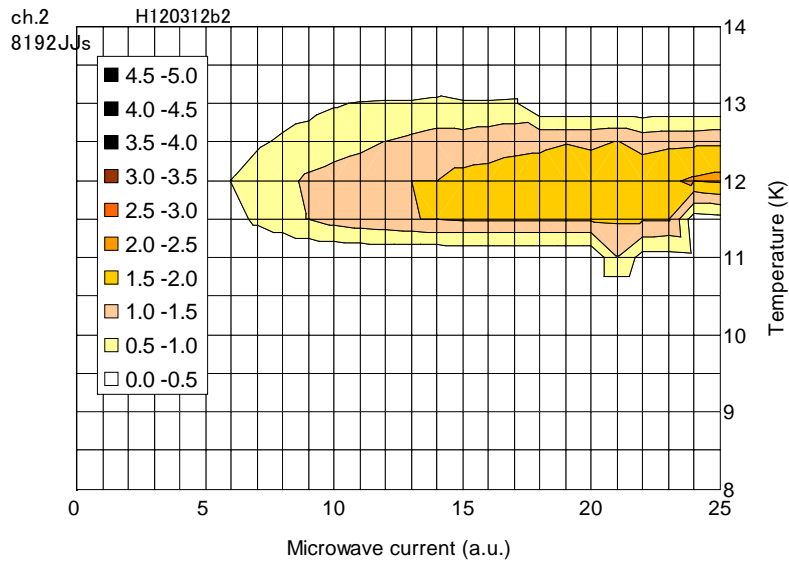


図 2-4-2 新品の Ti ターゲットで作製したチップの動作範囲

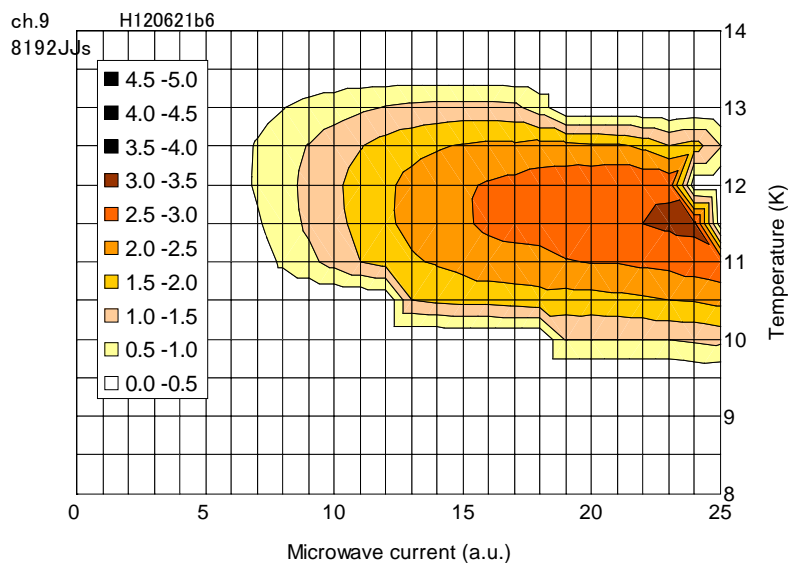


図 2-4-3 長年使い込んだ Ti ターゲットで作製したチップの動作範囲

2-4-2 ジョセフソン素子製作条件の最適化

(1) パーティクル低減法の確立

2011年3月11日の震災により、真空装置が故障し半年以上素子作製ができなかった。すべての装置の修理が完了し素子作製を再開できたのは2011年の11月頃であったが、ほとんどが問題のある不良チップで良チップはほとんど得られなかった。具体的にはショートにより接合数が設計より少なくなったり、接合アレーがグランドとショ

ートしたりする故障が非常に多く、これらの原因としてゴミによる故障が疑われた。しかし、適当な評価装置がなく、科学的な裏付けを欠いた。

2012年度に新しいクリーンルームへの素子作製装置の移転と立ち上げにより、素子作製が更に約半年間停止した。2013年1月からほぼ本格的に稼動した新しいクリーンルームでは新たに導入したパーティクルカウンタでゴミの評価をおこなった。また、このクリーンルームでは、これまでのバッチ式のエッチング装置に代わってロードロック式のエッチング装置が導入された。図 2-4-4 に従来のバッチ式とロードロック式の真空装置の概略図を示す。バッチ式ではメインチャンバの上部のフタを開け閉めすることでウェハを出し入れするために、ウェハの搬送時にゴミも一緒にチャンバ内に取り込む欠点があった。一方、ロードロック式ではエッチングを行うメインチャンバに加えてもう1つ準備室のサブチャンバを備えており、サブチャンバであらかじめ真空引きを行うためメインのチャンバ内は常にクリーンな環境が維持される利点がある。また準備室はメインチャンバよりも容積が小さいため真空にひく時間も大幅に短縮されるので作業効率の改善にもなる。



(a) 従来のバッチ式

(b) 新たに導入したロードロック式

図 2-4-4 ロードロック式エッチング装置の導入

ロードロック式の成膜装置またはエッチング装置は、作業終了後にウェハはサブチャンバから取り出される。このとき、サブチャンバに窒素を導入することで真空から大気圧にする。電極を成膜する装置において、準備室に導入する窒素ガス圧とウェハ表面に付着するパーティクルの関係を調べた結果が図 2-4-5 である。ガス圧が大きいほど短時間に真空を破ることができるがウェハ表面には多くのパーティクルが付着することがわかった。多少時間はかかるが、ガス圧を小さくしてゆっくり真空を破る必要がある。パーティクルの発生源は明らかではないが、これを調べた装置では、ウェハを搬入する前にはアルコールでサブチャンバ内をアルコールで拭き掃除している。

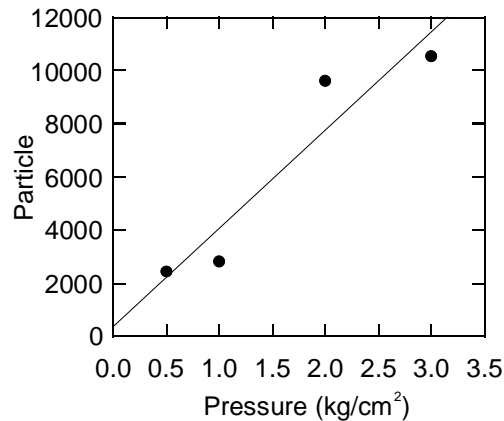


図 2-4-5 チャンババント窒素ガス圧とパーティクルの関係

また、パーティクルの発生源としてもう一つ明らかになったものがあった。これまでウェハー上についたゴミを吹き飛ばす目的で図 2-4-6 の写真のような窒素ガンを使用してきた。実際に目で見えるくらい大きなごみを取り除くのに窒素ガンは有効である。ところが、窒素ガンをあてたウェハー上のパーティクルを調べたところ、図 2-4-5 で示すように、肉眼では認識できない大きさのパーティクルは減っているどころか、ガス圧が大きいほど増えていることが明らかとなった。測定方法は、新品のウェハーに窒素ガンで窒素の圧力を変えて1分間噴きつけパーティクルを測定した。(a)は 0.3 ミクロン以下のサイズで、電極の膜厚と同程度であり、バリアのショートの原因となりうる。一方、(b)はさらに大きな1 ミクロンから5 ミクロンのパーティクルで、下部電極同士の間隔1.6 ミクロンまたは下部電極と外部導体の間隔3 ミクロンと同程度であるので、これもショートの原因となりうる。窒素ガンにはフィルターがついているのでパーティクルの発生源が不明であるが、静電気によりウェハー表面にパーティクルをつけていると考えられる。ウェハーにはゴミをつけないように最新の注意を払うことが重要で、窒素ガンは使用しないこととする。



図 2-4-6 窒素ガンの写真

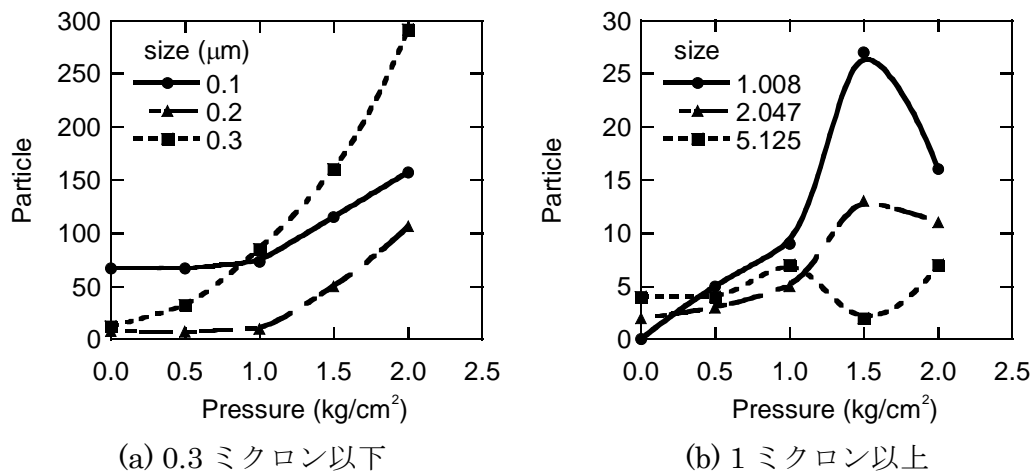


図 2-4-7 窒素ガンのガス圧とパーティクルの関係

(2) エッチング終点検出の導入

これまでのエッチング装置の終点検出は、ガラス窓から覗いて目視で行われていたため、熟練が必要で再現性に乏しかった。新しいエッチング装置ではロードロック式になったことに加えて、プラズマ分光による終点検出が導入された。図 2-4-8 はプラズマ分光による終点検出の例である。波長 704.46nm の光の強度をモニタして、これの 1 次微分と 2 次微分の変化からエッチングの終わりを判断する。この例では、図中の破線がエッチング終了条件に一致した時間で、さらに 30 秒のオーバーエッチをして自動的にエッチングが終了するようにプログラミングされている。終点検出を自動化することにより、再現性の向上が期待される。

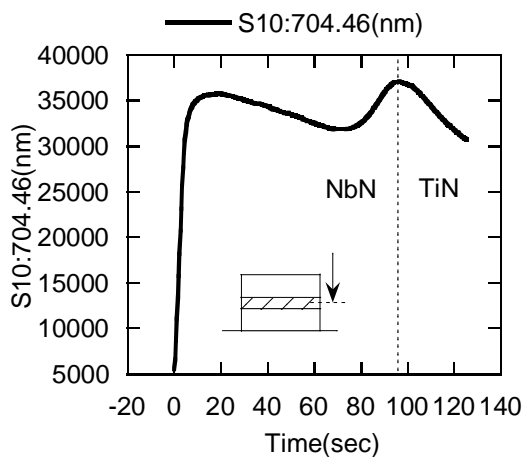


図 2-4-8 プラズマ分光による終点検出の例

2-4-3 ジョセフソン素子の作製歩留評価

1次シャピロステップの大きさで動作マージンを評価し、ウェハー面内分布を調べたものが図 2-4-9 である。中心部ほど動作マージンが大きく同心円状に分布している。これは、成膜装置の膜厚分布が同心円状であり、とりわけ終端抵抗の分布が大きく影響していると考えられる。

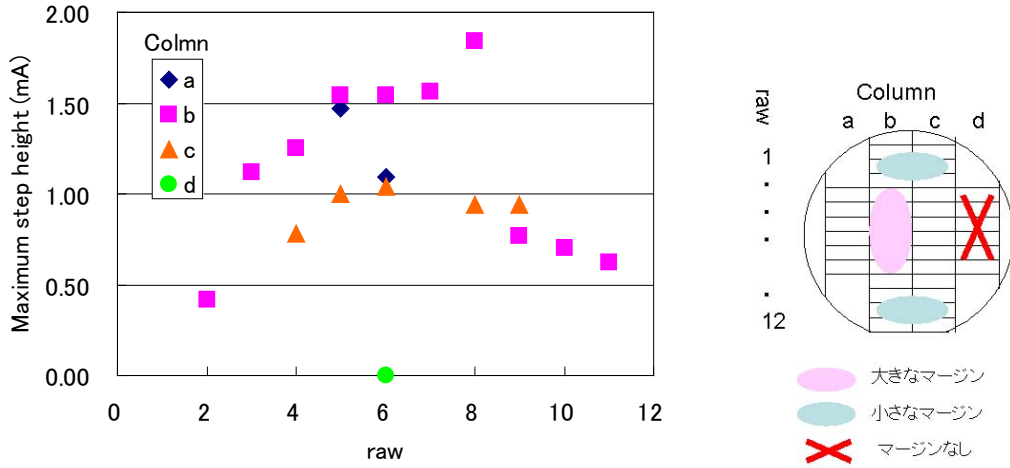


図 2-4-9 動作マージンのウェハー面内分布

出力電圧1V以上の平均歩留 (%)

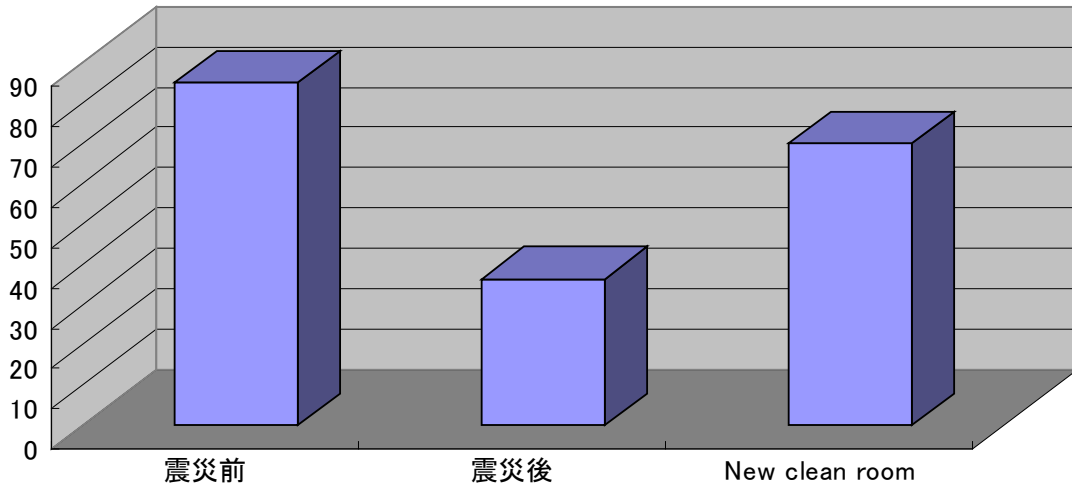


図 2-4-10 動作マージンのウェハー面内分布

表 2-4-1 作製歩留のまとめ

震災前(FY2009)

ウェハー	出力電圧		不良	未測定	歩留(%)
	2V	1V			
A	3	3	3	27	67
B	1	6	0	29	100
C	3	1	0	32	100
合計	7	10	3	88	
歩留(%)	35	50	15		
出力電圧1V以上の平均歩留				85	%

震災後 (FY2012)

ウェハー	出力電圧		不良	未測定	歩留(%)
	2V	1V			
D	0	1	1	34	50
E	0	1	1	34	50
F	0	1	1	34	50
G	0	1	4	31	20
合計	0	4	7	133	
歩留(%)	0	36	64		
出力電圧1V以上の平均歩留				36	%

New clean room (FY2012)

ウェハー	出力電圧		不良	未測定	歩留(%)
	2V	1V			
H	2	5	3	26	70
合計	2	5	3	26	
歩留(%)	20	50	30		
出力電圧1V以上の平均歩留				70	%

表 2-4-1 に作製歩留について、震災前(FY2009)と、震災後(本プロジェクト期間中)のクリーンルーム移設前後の状況をまとめた。温度 $12 \pm 0.5\text{K}$ 、マイクロ波電力 $200 \pm 30 \text{ mW}$ の範囲で、約 1mA 程度の電流マージンを有し、出力電圧が 1V 以上のチップの平均作製歩留を図 2-4-10 に示す。震災後に作製歩留が半分程度に減少したが、装置の故障が原因か、半年間作製プロセスを停止していたことが原因かは明らかではない。新しいクリーンルームに移設し、定量的にパーティクルの評価を行い、パーティクルに対する対策を行うことでほぼ震災前の作製歩留にまで戻すことができた。本プロジェクト期間中に選別した 1V 以上の出力を持つチップの個数は 11 個で、さらに未測定チップの中にも作製歩留から類推すると、クリーンルーム移設前のウェハには $133\text{die} \times 36\%=48$ 個、クリーンルーム移設後のウェハには $26\text{die} \times 70\%=18$ 個、計 66 個の良チップがあると期待される。また震災前に作製した未測定のチップにも $88\text{die} \times 85\%=75$ 個の良チップがあると推測され、未測定のチップを選別することにより合計 141 個の良チップが得られる可能性がある。本プロジェクト遂行において 10 台程度の製品化には十分なチップ数を確保できただけでなく、本プロジェクト終了後のさらなる展開にも対応できるだけのチップ数を確保できた。

2-4-4 まとめと今後の課題

新しいクリーンルームにおいてロードロック式のエッチング装置を導入し、装置の立上とジョセフソン素子製作条件の最適化をおこなった。またパーティクルの個数を定量的に評価し、素子不良の原因となりえるパーティクル混入の原因のいくつかを突き止めたことにより、耐環境雑音性に優れたジョセフソン素子を安定的に作製する見通しを得た。また、震災により素子作製ができない期間に、素子の選別作業を行い、作製歩留を調査することで、未測定のチップの中に利用可能なチップがどの程度含まれているか統計的に推測したところ、100 個以上のチップが利用可能であることがわかった。ただし、現時点でチップの選別作業は 1 個ずつ冷凍機で冷却して測定する必要があり、特性評価はすでにプログラムにより自動化が完了しているが、それでもチップの冷却と特性評価に丸 1 日かかってしまうので、選別作業の高速化と効率化が今後の課題である。

2-5 [課題5] 装置の安定度及び操作性の評価

2-5-1 評価の目的と評価方法の概要

本研究の主要な目的は、誰でも容易に使用可能な小型汎用ジョセフソン電圧標準(PJVS)装置として製品化することである。製品化において最も重要なのは、ジョセフソン電圧標準や極低温冷凍技術について特別な知見を有しない一般のユーザーにとって容易に操作でき、かつ測定値の信頼性が保証されることである。そこで本課題[5]においては、電気的特性の評価、および操作性の評価について、それぞれ評価・検証を実施する。

平成23年度末に評価に使用するサポイン1号機が完成し、本格的な評価を開始した。また、平成24年度9月末に2号機が完成し、研究参画の企業間で持ち回りの試験を実施した。

本報告では、上記の電気的特性および操作性の評価結果また2号機の持ち回り試験の結果について報告する。

2-5-2 装置の電気的特性評価

PJVS 装置の電気的特性の評価は、主に長野県工業技術総合センターが担当し、産業技術総合研究所計測標準部門が技術的サポートを行った。

装置の特性を評価するにあたり、評価項目の明確化と各評価項目についての評価方法を検討した結果、評価項目は、装置の(1)温度依存性、(2)長期安定度、(3)出力直線性、(4)ウォームアップに必要な時間、(5)出力抵抗、(6)電源変動依存性、(7)移動による影響、(8)消費電力の評価とした。以下に評価結果を述べる。

(0) 電圧測定方法に関する注意点

開発電圧標準装置の出力電圧はジョセフソン素子の出力電圧ではなく、それを基準に校正された DAC 回路の出力電圧である。電圧出力に使用する DAC の出力電圧ドリフトが $1(\mu\text{V}/\text{V})/\text{h}$ と比較的大きい。これを可能な限り低減するため、電圧測定は図 2-5-1 に示すフローチャートに従って行った。出力電圧の測定値は次式によって求めた。

$$V_{\text{DVM}} = \frac{V_{\text{outp1}} + V_{\text{outn1}} + V_{\text{outn2}} + V_{\text{outp2}}}{4} \quad (2-5-1)$$

一方、開発電圧標準装置の出力電圧の理論値は、次式により求めた。

$$V_{\text{out}} = N_{\text{DACs}} \times \left(V_{\text{JVS}} + \frac{V_{\text{calp1}} + V_{\text{calm1}} + V_{\text{calm2}} + V_{\text{calp2}}}{4} \right) \quad (2-5-2)$$

ただし、 N_{DACs} は電圧出力時に設定する電圧増倍回路の増倍比、 V_{calp1} 、 V_{calm1} 、 V_{calm2} 、 V_{calp2} はそれぞれ図 2-5-1 のフローチャートの Calibrate[+](1)、Calibrate[-](1)、Calibrate[-](2)および Calibrate[+](2)で取得した値(ジョセフソン素子出力電圧と DAC 出力電圧の差電圧)である。また、 V_{JVS} は以下の式で計算されるジョセフソン素子の出力電圧である。

$$V_{JVS} = \frac{nf}{K_{J-90}} \quad (2-5-3)$$

ここで n は電圧出力に使用するジョセフソン素子の素子数、 f [GHz] は印加したマイクロ波の周波数、ジョセフソン定数 K_{J-90} は 1990 年の協定値で、 $K_{J-90}=483\,597.9$ GHz/V である。

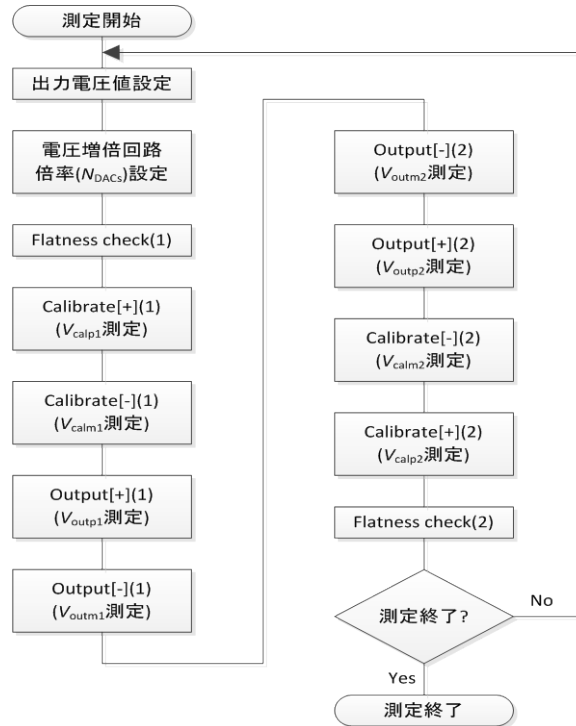


図 2-5-1 電圧測定チャート

(1) 出力電圧の温度依存性

試験は出力電圧 10V(DAC 数×10)、1V(DAC 数×10)、1V(DAC 数×1)、0V(Output OFF 状態)について行った。試験結果を図 2-5-2、表 2-5-1 に示す。

0.1 μ V/V 精度の測定を行う場合には出力電圧 1V 時には $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 、10V 時には $\pm 1.4^\circ\text{C}$ の温度変化に制限する必要がある。10V 出力時の温度制御はおおむね現実的な値であるが、1V 出力時の $\pm 0.25^\circ\text{C}$ の特殊空調は電気標準の設備としては難しい。 $\pm 1^\circ\text{C}$ の幅に入るように温度特性の改善を図ることが望ましい。

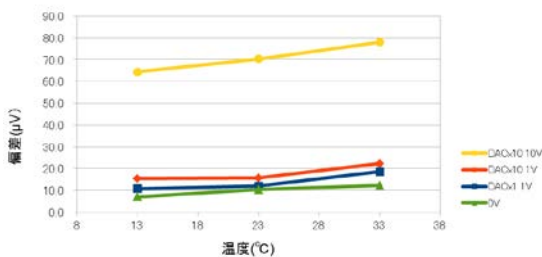


図 2-5-2 温度特性

表 2-5-1 温度特性

環境温度(°C)		13	23	33	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
偏差 (μV)	DACx1 1V	10.7	11.9	18.5	0.39
	DACx10 1V	15.4	15.6	22.3	0.35
	DACx10 10V	64.4	70.3	77.9	0.68
	0V	7.1	10.4	12.2	0.25

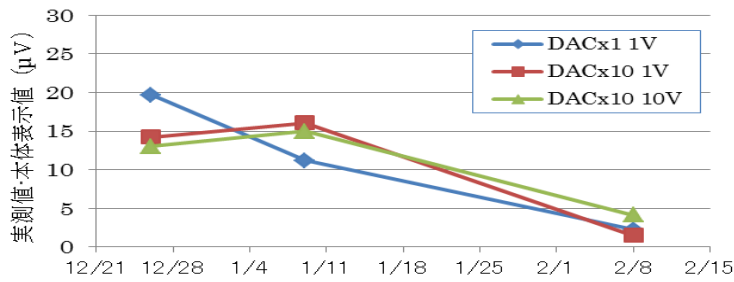


図 2-5-3 長期安定度評価結果

(2) 長期安定度

PJVS の出力電圧はジョセフソン素子の出力電圧によって校正された電圧増倍回路の出力電圧である。ジョセフソン素子の出力は不変であるが、電圧増倍回路の出力電圧は経年変化すると考えられる。長期安定度は Cal 実行後の電圧増倍回路の出力電圧値の変化を数か月にわたり評価する。試験結果を図 2-5-3 に示す。電圧標準器の経年変化は各レンジで 10 μ V/V/month 以上と大きい、電圧増倍回路の安定化と Cal の方法の改良が実施されればジョセフソン素子に近い精度の電圧出力が期待できる。

(3) 出力直線性

図 2-5-4 はサポイン 1 号機と 2 号機の測定結果(偏差のみ)である。PJVS の理論出力値とデジタル電圧計の測定値の偏差を見ると電圧増倍回路の増倍比の設定に関わらず 10 μ V~20 μ V 程度生じている。また、Rftune オプションの有無による違いを見ると、DAC \times 5 設定と DAC \times 10 設定では一部で違いが表れている。このような結果となった原因を検討するため、また直線性測定方法の妥当性の確認のために PJVS 装置内部のジョセフソン素子が発生する電圧を直接測定し、その直線性を評価した。図 2-5-5 にジョセフソン素子の出力電圧の直線性測定結果を示す。偏差 δ は以下の式で計算した。

$$\delta = V_{DVM} - V_{JVS} \quad (2-5-4)$$

V_{JVS} は式(2-5-3)で求められるジョセフソン素子の出力電圧値である。特定の条件では Rftune ON としたときマイクロ波電力が不十分となり、ジョセフソン素子が理論値通りの電圧を出力できていないと考えられる。市販化の際はこれらの条件に設定できないようにするか、設定された際に注意を促すメッセージを表示することが望ましい。

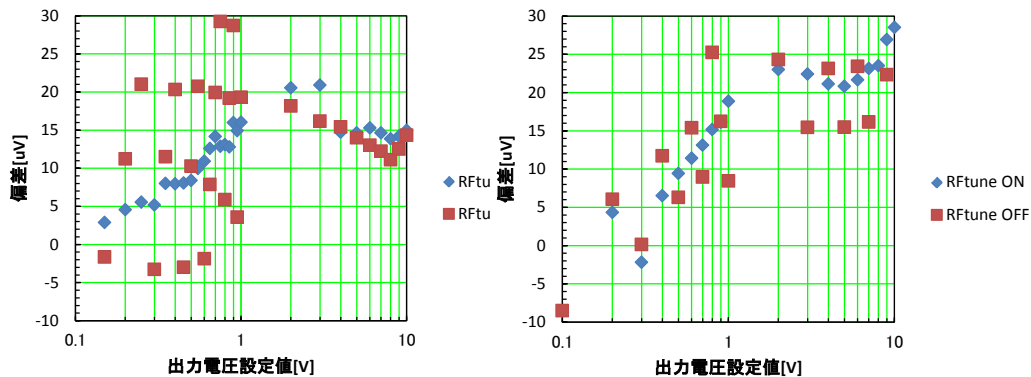


図 2-5-4 DAC \times 10 設定の偏差(左 1 号機 右 2 号機)

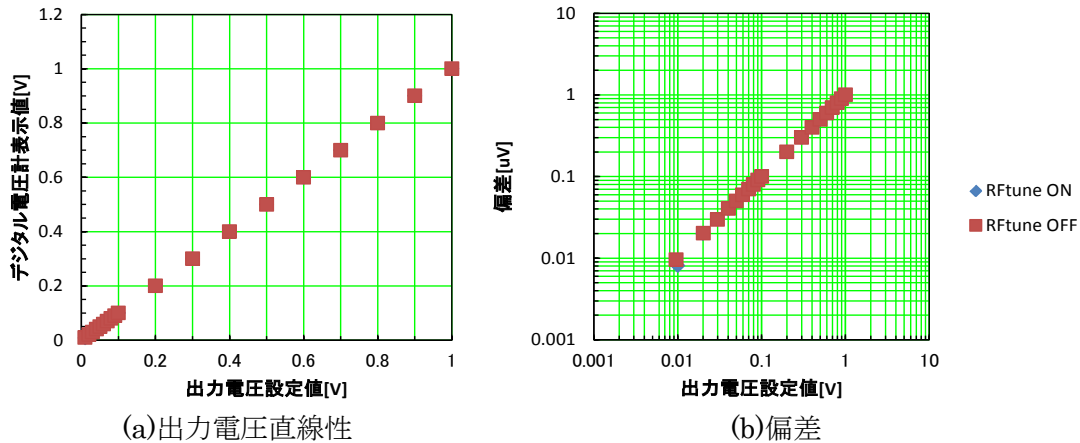


図 2-5-5 ジョセフソン素子の出力電圧直線性

以下に得られた結果を要約して示す。

- (i) ジョセフソン素子から出力電圧は極めて安定で、その直線性も非常によい。
- (ii) それに対し開発電圧標準装置の出力電圧は直線的であるものの理論出力値と実際に出力される値に数 10uV のオフセットが生じている。これは DAC の特性、DAC 出力電圧の校正精度、DAC から電圧出力端子までの回路、リレーなどの接点部品または配線の熱起電力が影響していると推察される。
- (iii) 出力電圧がオフセットしているもの(ii)と同様に、DAC の特性、DAC 出力電圧の校正精度(オフセット測定精度)、DAC から電圧出力端子までの部品、回路、リレーなどの接点部品または配線の熱起電力などの影響によるものと考えられる。
- (iv) RFtune ON のとき、開発電圧標準装置の出力電圧が低い領域で偏差が極端に大きくなってしまふのは、ジョセフソン素子の出力電圧が不安定で、DAC 出力電圧の校正が正常に行えないためである。

目標値を満足するためには、直線性の改善およびオフセットの排除が必須である。ジョセフソン素子そのものは十分な特性が得られているため、直線性改善やオフセット排除することで目標値を満足し、超高安定度な電圧標準装置にできる見込みである。

(4) ウォームアップにかかる時間

表 2-5-2 に結果をまとめた。1 号機評価時と 2 号機評価時では真空排気装置およびコンプレッサーは同一のものを使用している。表 2-5-2 から真空装置の起動から電圧出力できるようになるまではおよそ 3 時間かかる。

図 2-5-6 に 1 号機の出力電圧ドリフトの測定結果を示す。測定結果から、24 時間経過後も収束している様子はなく $1(\mu\text{V}/\text{V})/\text{h}$ の電圧ドリフトがある。また、同じ 1V 出力時でも DAC $\times 1$ 設定と DAC $\times 10$ 設定で変化の様子が異なる。それに対し、DAC $\times 1$ 設定で 1V 出力する場合と DAC $\times 10$ 設定で 10V を出力する場合は類似した特性となっている。これは、この 2 つの条件はどちらも DAC1 個あたりの出力電圧は 1V であるため、出力電圧ドリフトの様子が同じようになったと考えられる。

表 2-5-2 電源投入から電圧出力までの時間

経過時間(時間:分)		動作内容
1号機	2号機	
0:00	0:00	本体電源オン
0:03	0:04	ソフト起動
0:05	0:05	コンプレッサー電源オン
2:45	3:11	冷却完了
3:00	3:25	立ち上げプロセス終了、電圧設定
3:03	3:26	Output[+]
-	3:28	Cal 値ダイアログ出

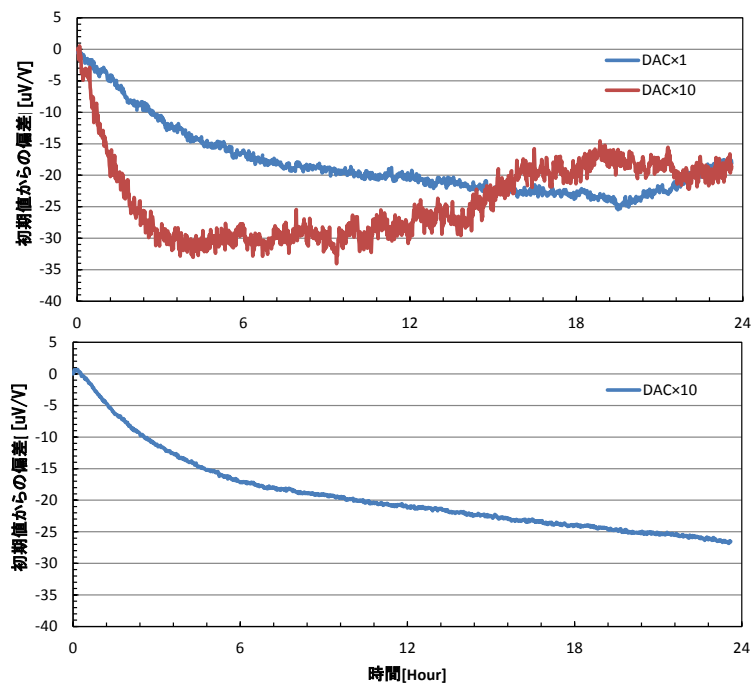


図 2-5-6 出力電圧の安定度 1V(上)と 10V(下) (1号機)

(4.1)DAC 単体評価

今回得られた結果のように出力電圧が変化してしまう要因としては、DAC 出力電圧の変動、DAC のリファレンス電圧の変動および電圧増倍回路モジュール内部の温度変化による影響が考えられる。そこで、電圧増倍回路モジュール単体の評価を行った。

図 2-5-7(上)に DAC 出力電圧とリファレンス電圧の時間変化、図 2-5-7(下)に電圧増倍回路内部温度の時間変化の様子を示す。約 50 時間経過後にはリファレンス電圧はほぼ安定しているのに対し、DAC 出力電圧はそれまでと同じように変動していく様子が確認できる。図 2-5-6(下)の温度測定点は、電圧増倍回路モジュールのケース内部温度、リファレンス電圧生成 IC 表面、DAC-IC 表面、AC100V から内部電源を生成する電源回路、DAC 回路電源生成用の三端子レギュレータの 5 か所である。電圧増倍回路モジュールのケース内部温度、

DAC-IC 表面温度、リファレンス電圧生成 IC 表面温度は約 15 時間経過後にはほぼ安定している。それ以降の電圧ドリフトの要因として温度の影響はほとんどないといえる。

以上から、開発電圧標準装置の出力電圧ドリフトの主な要因は、約 50 時間まではリファレンス電圧ドリフトによるもの、それ以降は DAC-IC のドリフトであると考えられる。

実際に直流電圧の校正時の測定時間を想定した短時間安定度は $0.1\mu\text{V/V}$ を満足しているが、さらに魅力ある製品とするため、出力電圧ドリフトの原因を特定し、ドリフトを小さくする改良を行うことが望ましい。電圧ドリフトを $0.1(\mu\text{V/V})/\text{h}$ 以下にすることができれば、電圧測定手順を簡略化でき、ユーザーの負担を減らして操作性を上げることができる。これは、事業化する上でも大きな利点になると考える。

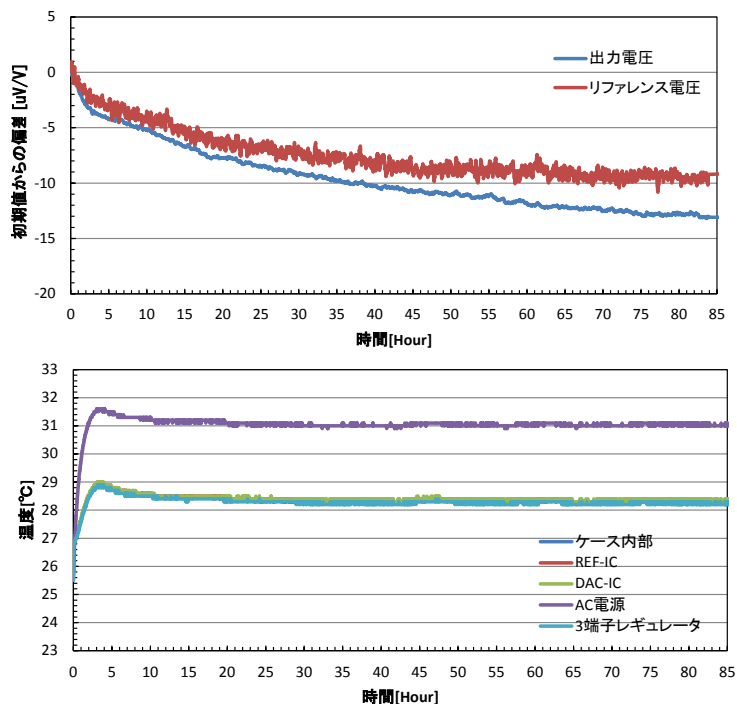


図 2-5-7 DAC 出力電圧と REF 電圧の時間変化(上)と電圧増倍回路内部温度変化(下)

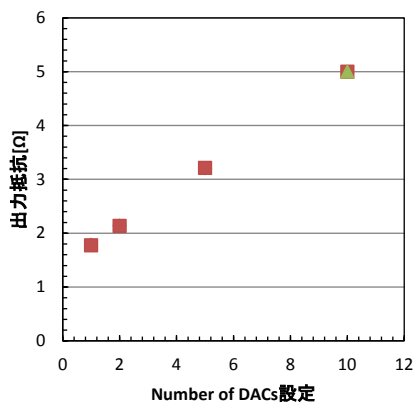


図 2-5-8 出力抵抗-DAC 数特性
(出力電流 1mA のとき)

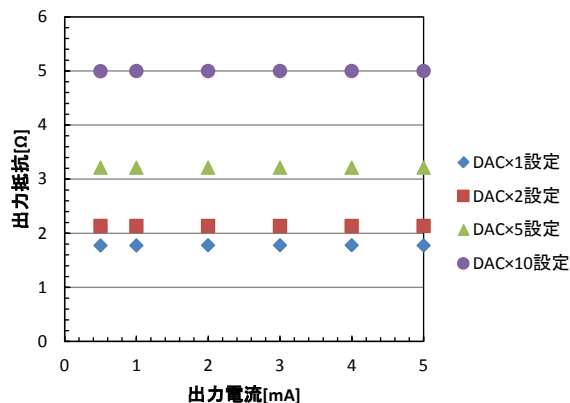


図 2-5-9 出力抵抗-出力電圧特性
(出力電圧 1V のとき)

(5) 出力抵抗

図 2-5-8、図 2-5-9 に出力抵抗測定結果を示す。これらより、出力抵抗は DAC×1 設定の場合は約 1.8Ω、DAC×10 設定の場合は約 5.0Ω であった。また、これらの値の出力電圧依存性、出力電流依存性は見られない。

出力抵抗の特性とは異なるが、負荷を低くし電流を増やすと 5mA 付近で出力電圧が低下する。出力電圧が低下した状態となった後は、出力電圧設定(SetVM)を再度行わないと電圧値は戻らない。定格出力電流仕様値は 1mA なので、実用上は問題のない動作である。ただし、出力電圧が不安定な状態になっても何も表示されないため、異常状態に入っていることをユーザーが容易に判別できるような仕組みが追加できれば、操作性の向上になる。

(6) 電源変動依存性

試験結果を図 2-5-10 に示す。図中では、100V 電源電圧使用時の電圧値を基準とし 80V、120V 電源電圧使用時の出力がそこからどれだけ変動しているかを表している。試験結果より電源電圧が 20V 変動したとしても出力電圧は 0.3uV/V 以下の変動しか見られず、実際に

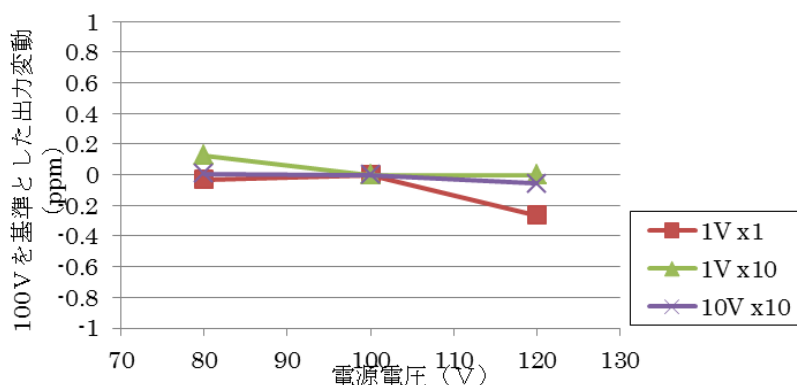


図 2-5-10 電源電圧依存性

ユーザーが本器を使用する際には電源電圧の変動を考慮する必要はないと考えられる。

(7) 移動による影響

移動による影響の評価ではこのような運用を想定し、本体にかかる移動、設置等のストレスが性能にどのような影響を与えるかを評価する。

(7-1) 測定スケジュール

移動による影響の評価のための測定は 2 号機の持ち回り試験による移設のたびに行う。2 号機の持ち回り試験のスケジュールは以下の表 2-5-3 のように行われる。2 号機の試験は 9 月 26 日からの評価①、11 月 21 日からの評価②、2 月 15 日からの評価③の 3 回とする。

表 2-5-3 2号機移動スケジュール

日時	場所	目的
9月26日～10月22日	長野県工業技術総合センター（岡谷）	2号機評価 ①
10月26日～11月8日	日本電気計器検定所（港区）	持ち回り試験
11月9日	大田区産業プラザ（大田区）	展示
11月15日～11月20日	長野県工業技術総合センター（岡谷）	持ち回り試験(横河)
11月21日～12月11日	長野県工業技術総合センター（岡谷）	2号機評価 ②
12月13日～2月5日	産業技術総合研究所（つくば市）	不具合対応、持回試験
2月6日	東京都千代田区	サポイン ヒアリング
2月8日	産業技術総合研究所（つくば市）	展示
2月15日～	長野県工業技術総合センター（岡谷）	2号機評価 ③

(7-2)測定結果

評価結果を図 2-5-11、図 2-5-12 に示す。

今回の試験結果からは移動を行った後に試験を行うと数 $\mu\text{V/V}$ から十数 $\mu\text{V/V}$ の変化が見られたが、DAC 出力の値がドリフトする問題があり必ずしも移動による影響であるといい切れない。移動による影響を明らかにするためには電圧増倍回路出力電圧のドリフトを低減する改良を行い、その後改めて移動による影響を評価することが望ましい。

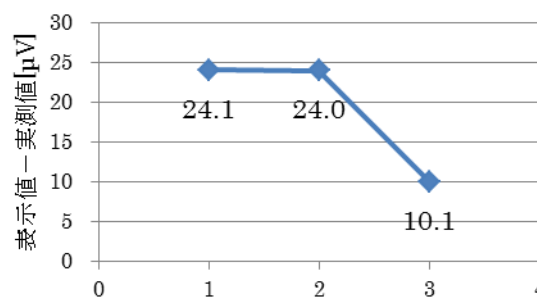
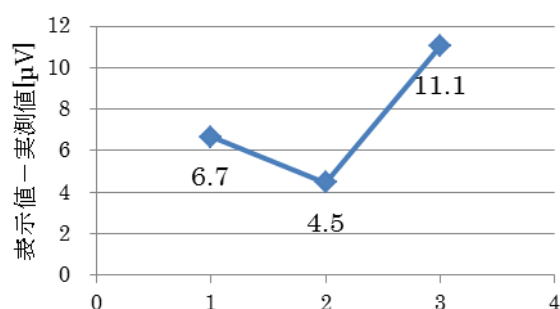


図 2-5-11 移動による影響(1V、DAC×1) 図 2-5-12 移動による影響(10V、DAC×10)

(8) 消費電力

開発電圧標準装置 1号機と 2号機の消費電力と力率の測定結果を表 2-5-4、真空排気装置の消費電力と力率の測定結果を表 2-5-5 にまとめた。

最大消費電力、平均消費電力ともに 1号機に比べ、2号機の方がパネル PC の消費電力の差の分だけ小さい値となっている。電圧標準装置としてみると消費電力が大きいですが力率が低く、ノイズ対策のためにも事業化の際には力率改善が必要になる可能性がある。この対策そのものはそれほど難しいことではないため、事業化までに解決できればよい。

表 2-5-4 開発電圧標準装置の消費電力と力率(上段：消費電力、下段：力率)

項目	1号機	2号機	備考
最大消費電力	106W 75%	93W 76%	起動プロセス中の Optimize TEMP/RF で最大電力値(数分間)
平均消費電力	92W 72%	80W 73%	開発電圧標準装置から電圧出力が可能になったあとの平均値
スタンバイ①	41W 60%	29W 65%	電圧標準装置としてのソフトウェアは起動しておらず、パネル PC のみ立ち上がっている状態での値
スタンバイ②	17W 68%	12W 80%	パネル PC は起動していないが、装置背面の電源スイッチが ON の状態での値

表 2-5-5 真空排気装置の消費電力と力率(上段：消費電力、下段：力率)

項目	1号機、2号機共通	備考
最大消費電力	55W 69%	真空排気開始後から 1200Hz 到達までの間で最大電力値(数分間)
平均消費電力①	45W 68%	ターボ分子ポンプ回転数が 1200Hz 到達後の値
平均消費電力②	27W 67%	ターボ分子ポンプ回転数が 1500Hz 到達後の値
スタンバイ	15W 68%	真空排気動作はしておらず装置表面の電源スイッチが ON しているだけの状態での値

2-5-3 装置の操作性評価

長野県工業技術総合センターで開催している電気計測研究会の協力を得て本研究の電圧標準装置 1号機の操作性についての意見を研究会会員から集めることができた。計測研究会の会員は製造業の開発技術者、品質管理技術者、技術営業担当者である。アンケートはジョセフソン効果と 1号機の内部構造を説明した後行った。

以下に操作性についてアンケートを行った結果をまとめた。

(1) 操作性

装置の操作性については、(a)ソフトが直感的に分かりにくい。(b)タッチパネルが小さい。(c)ミスタッチを防ぐように専用ペンを付属させてはどうか。(d)動作中と終了時の識別があったほうがよい。(e)ボタンが小さいのでミスタッチしてしまう。(f)設定項目、項目の数はちょうどよい等の指摘がなされた。

(2) 性能

装置の性能については、(a)最大出力電圧 16V、最大出力電流 5mA 出力で十分だが、不確かさは 0.1ppm では不足かもしれない。0.05ppm は欲しい。(b)出力値の不確かさ検証の方法も考慮 仕様書に記載が必要である。(c)過負荷時にスペック外のメッセージがあ

ればよい。(e)ショート時用に保護回路が必要だと思う。(f)環境温度の範囲はどのようになるのか? $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内ならば問題ない等の指摘がなされた。

(3) 機能

装置の機能(追加して欲しい等も含め)については、(a)LAN,DVI,GPIBなどの外部接続端子の追加をして欲しい。USB端子を追加して欲しい。(b)真空ポンプ、コンプレッサーの小型化をしてほしい。(c)DACの10分間安定性評価の情報を知りたい。(d)PCでの動作制御コードのマニュアル、サンプルコードが欲しい等の意見が出された。

(4) その他について

その他の操作性に関する意見として、(a)コンプレッサーの騒音、廃熱をもっと小さくして欲しい。(b)端子を改良したほうが良いのでは?(もっと大きく、高剛性、低熱起電力)(c)デザインにもう少しお金をかけてよいのでは?(d)本体サイズは適正だと思う。(e)セッティング時間がかかりすぎる等の指摘がなされた。

上記の説明会とアンケートは2012年6月に行い集計結果を2号機設計に反映した。アンケート結果の中にはさらに研究開発に時間を必要とするものもあり、これらは今後も継続して取り組まなければならない課題であるが、ユーザインターフェース等の意見については2号機操作性の改善に寄与している。

2-5-4 持ち回り試験の結果報告

試作2号機を利用して持ち回り試験の結果を報告する。持ち回り試験を実施する期間と試験実施者は表2-5-6のとおりである。

表 2-5-6 持ち回り試験スケジュール

日時	設置場所	試験実施者
10月26日～11月8日	日本電気計器検定所(港区)	日本電気計器検定所
11月15日～11月20日	長野県工業技術総合センター(岡谷)	横河電機株式会社
12月13日～2月5日	産業技術総合研究所(つくば市)	計量標準総合センター

(1) PJVS サポイン試作機操作性評価結果 (横河電機株式会社報告書)

PJVS サポイン試作機(以下、試作機)の操作性の評価を実施したので、評価結果を表形式で報告する。報告内容の記述にあたっては、本研究の目的である、「非熟練者でも容易に操作可能であること」に主眼をおいた。

表 2-5-7 非熟練者が操作した場合の試作機の操作性について

No.	利点 欠点	ソフト ハード	内容	欠点であった場合の 向上策の一提案
1	利点	ソフト	PJVS 本体、真空排気装置、冷凍機などの立ち上げ手順に従い、各機器の立ち上げと PJVS 本体の操作を行えば、各機器に異常が発生しない限り、特に JVS や真空装置、冷凍機などに関する特殊技術や知識も必要なく高精度な電圧を得ることができる。	
2	欠点	ハード	市販化されている高精度な電圧発生器では、電圧出力の Lo 端子、カード端子、および、Ground 端子は独立しており、校正の状況に応じたコモン接続が可能であるが、PJVS 試作機はガード端子と Ground 端子が接続しているようであり、その自由度が限定される。	本 PJVS を市販化する際は、電圧出力の Lo 端子、カード端子、および、Ground 端子の接続方式は、校正業界で広く使用されている高精度電圧発生器と同様な方式にする必要がある。
3	欠点	ソフト	シャットダウン方法が SETUP モード (HomeA) の WarmUp をクリックするようになっているので直感的でない。	SETUP モード (HomeA) の END 表示をボタン化して終了させられればより直感的で受け入れやすい。
4	欠点	ハード	背面端子へのケーブルの着脱が行いにくい。	背面端子間のクリアランスを拡大することが望ましい。
5	欠点	ハード ソフト	各種設定ウィンドウの反応が悪い、クリック感がない、ターゲットが小さい。	ボタン表示にする。表示を大きくする。
6	欠点	ハード	本体の端子部の表示に関して、入出力端子の信号の仕様が不明である。	端子部に振幅、周波数などを表示する。
7	欠点	ハード	真空排気系の配管が浮いた状態になっており、接地電圧が 50V 以上あり、大変危険である。	安全に関する仕様の明確化と確認、対策等の検討を行うことが望ましい。
8	欠点	ソフト	SETUP モード (HomeA) において Expert モード内の機能は JVS を理解した専門家だけの機能であり、また、Expert モードはトラブル時の解析の為の機能と考えられる。	Expert 内の機能の内、通常校正で使用できるものとトラブル解析と処置に使用する機能を分け、トラブル解析と処置に使用する機能はサービスモードとして区別することが望ましい。

(以上)

(2) 小型 PJVS 装置巡回評価試験報告 (日本電気計器検定所報告書)

課題 5 の小型 PJVS 装置の巡回評価試験の一環として、日本電気計器検定所技術研究所において同装置の巡回評価試験を実施した。今回の巡回評価試験における主な評価項目は下記の通りである。

1. 電圧増倍回路のノイズ特性の確認

(同軸シールド型電源回路のノイズ低減に対する有効性)

2. ジョセフソン素子のノイズ耐性の定量的評価

(PJVS 素子に印可されるノイズと、磁束トラップの関係の定量的な評価)

(2-1) まとめと提言

ジョセフソン素子のノイズ耐性の評価においては、コンデンサを用いて疑似パルスを印加する方法を試みた。この方法は、パルスの影響を定量的に評価する手法として極めて有効であり、今後この方法をさらに発展させて、ジョセフソン素子のノイズ耐性の評価方法を確立させたい。

一方、素子保護の観点から印加するパルスパワーを制限したため、磁束トラップの発生には至らなかったが、今後素子破壊に至らない程度にピーク電流値や繰り返し回数を増大させて、磁束トラップ発生条件を求めたい。

電圧増倍回路のノイズ特性評価においては、全ての電源をオフにした状態から、実際に電圧増倍回路から 10V を出力させた状態まで測定条件を変化させて、出力端子間でノイズ電圧を観測した。観測されたノイズは、パネル PC のクロック周波数(1.6GHz)に由来すると思われる高周波ノイズが支配的であり、それ以外で検出感度の 10mV を上回る大きさのノイズは観測されなかった。ただし、基本的に電圧増倍回路単体での測定であり、コンプレッサーや、マイクロ波発生回路等の他のモジュールが発生するノイズに関しては、別途評価を行う必要がある。

また、今後の小型 PJVS システムの改善に向けて以下のような項目を検討課題とした。

1. ジョセフソン素子の直接出力が利用すれば、外部の分圧回路を用いて、電圧増倍回路出力の精度を直接的に確認できる。
2. 直列／並列変換方式による電圧増倍比の精度は、リレーの接点の性能に依存する。接点の経年劣化を定量的に評価することが重要。
3. マーケットサイズの拡大を考えると、電力応用は可能性が高い。ただし、この場合には 2 チャンネルの交流波形の発生が必須。

(以上)

(3) 小型 PJVS 装置巡回評価試験報告 (産業技術総合研究所計測標準研究部門報告書)

戦略的基盤技術高度化支援事業「制御ソフトウェアの高度化による産業用超安定度電

圧標準装置の開発」に係る、課題 5 の小型 PJVS 装置の巡回評価試験の一環として、平成 25 年 1 月 7 日から同年 1 月 21 日の約 2 週間にわたって、産業技術総合研究所計測標準研究部門電磁気計測科において同装置の巡回評価試験を実施した。今回の巡回評価試験においては、小型 PJVS 装置の出力安定度の評価を行う事を主要な課題とした。

(3-1) まとめと今後の課題

今後の小型 PJVS 装置およびツェナー校正システムの改善に向けての検討課題 4 項目を、重要なものから順に、下記に箇条書きに示す。

1. 電圧増倍回路出力における 1ppm の飛びの原因の追及。---ツェナー電圧標準器の校正値が 2 日間以上にわたって、連続して 0.1ppm 以内の安定度を示した事は、ジョセフソン電圧出力を用いて安定化された電圧増倍回路出力のポテンシャルを示すと考えられる。一方、原因不明の 1ppm の飛びは、ツェナー電圧標準器を凌駕する安定度を目指した本プロジェクトの目標に照らして致命的な問題である。早急に原因を特定して、対策を講じる必要がある。
2. 装置のノイズ耐性(EMI)の向上。---環境ノイズが比較的多い環境でも安定した測定が可能な様に、装置筐体のシールド性能や入出力ケーブル等のフィルタリング等の改善による装置のノイズ耐性(EMI)の向上を目指すとともに、ノイズ耐性の定量的な評価を行う事が重要。
3. ジョセフソン電圧出力の直接測定。---量子化電圧出力は、正常な動作条件においては、マイクロ波周波数の変動以外に変動要素を有しない筈である。しかしながら、今回の様に電圧増倍回路出力に問題が生じた場合に備えて、基準となる 1V のジョセフソン電圧出力を合わせて確認しておくことが望ましい。
4. アレー-SWAP 機能の自動化。---磁束トラップに敏感な素子、あるいは比較的マージンの小さな素子を用いる場合に備えて、常にマージンの大きなアレーを優先的に選択して用いる様に、プログラムを改良することが望ましい。

(以上)

2-5-5 まとめと今後の課題

試作された小型汎用ジョセフソン電圧標準装置に対して、電気的特性の評価および操作性の評価を実施した。電気的特性および操作性の評価から、まだ改善が必要である部分が多くあるものの市販化に向けた道筋はできたと考える。また、電気計測研究会や持ち回り試験を通し、ユーザーとなりうる企業の意見を聞いたことはさらなる改良に向け有意義であったと考える。

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果の総括

エレクトロニクス製品の品質保証の基準を与える高精度電圧発生器は、これまで外国製ツェナー二次標準装置に独占されてきたが、この装置は国家の一次電圧標準（液体 He 型 PJVS 装置）による定期校正が必要で維持管理が面倒である。また一次標準の液体 He 型 PJVS 装置は大型（液体 He 冷却が必要）でランニングコストも含め高価な装置となり、取り扱いも専門知識が必要で二次標準には適さない。これらの欠点を克服した電圧標準装置を作成し産業現場に導入可能な超高安定度の二次電圧標準を世界に先駆けて実現し、この分野における寡占状態を打破するために本開発を実施した。

本研究では、一次標準と同じジョセフソン素子の電圧発生原理を利用するので、原理的には定期校正の必要はないものであるが、少なくとも校正間隔を大幅に伸ばせる二次電圧標準装置を目指した。そして素子作製条件などの改良により絶対温度 12K で安定に動作し、かつ、環境雑音への耐性に優れたジョセフソン素子を実現したことにより、液体 He を使用せず装置の小型化と低廉化を進めた。またソフトウェアの高度化により高度な専門技術を必要とせず、高精度化・高安定化と容易な取扱いを実現した。また直流のみならず交流電圧発生にも対応しより広範囲なニーズに対応した。

3-1-1 課題別成果

[テーマ 1] 組込みソフトウェアの高度化

磁束トラップや局部常伝導転移などによる障害を自動的に検出・復旧させる機能を有する高度化した組込み制御ソフトウェアを開発した。また信頼性の高いソフトウェア検証手法を適用し開発コストを下げた。

[テーマ 2] 制御用ハードウェアの開発

制御用ハードウェアの省スペース化によって、ヘリウムガスコンプレッサーおよび交直変換装置を除くすべての要素部品を、ラックマウント可能な計測器サイズ(25cm x 43cm x 55cm 以下)に格納した。

[テーマ 3] ハードウェアシミュレータの開発

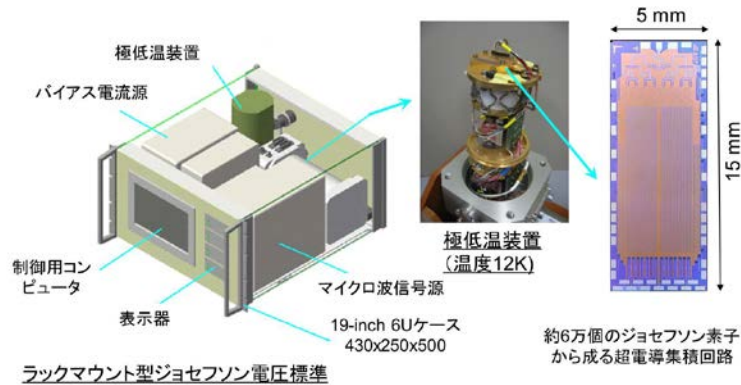
組込み制御ソフトウェア開発・検証の時間を短縮するために有効なツールとして、ジョセフソン素子への全ての入力に対し、応答時間 10ms で擬似応答するハードウェアシミュレータを開発した。

[テーマ 4] ジョセフソン素子作製技術の開発

絶対温度 12K で安定に動作し、かつ、環境雑音への耐性に優れたジョセフソン素子を実現し、実用的な良品率で素子作製できる条件を確立した。

[テーマ 5] 装置の安定度及び操作性の評価

長野県工業技術総合センターをハブとして、日本電気計器検定所□横河電機□産総研ナノエレクトロニクス研究部門□産総研計測標準研究部門において操作性等の評価を行った。



3-2 研究開発後の課題・事業化展開

3-2-1 製品化に向けて

- ・本プロジェクトの成果を踏まえ、(株)サンジェム、長野県工技センターおよび産業技術総合研究所が協力して製品の改良に向けた研究を継続する。
- ・ジョセフソン素子の安定な供給体制を確立する。

3-2-2 国内への事業展開

- ・製品の改良研究と平行して、国内の認定事業者および計測器メーカーへの普及活動を行う。
- ・国内企業を対象に、モニターとして装置の貸し出しを行い、その結果を製品の改良研究に繋げると同時に、製品の普及を図る。
(販売開始目標：H25年度内)

3-2-3 海外への事業展開

- ・海外安全規格(CE, FCC)の取得を目指し、必要に応じた製品の改良を行う。
- ・国際会議(CPEM, NCSLI)での発表や併設展示会等を利用して、海外の国立標準研究所および計測器メーカーへの普及を行う。
(販売開始目標：H27年度内)