

## Nb系薄膜を電極とするジョセフソン接合素子集積技術の開発とその応用

東海林 彰

旧電子技術総合研究所、産業技術総合研究所

### [要旨]

1981年に通商産業省（以下、通産省と記す）のプロジェクト「科学技術用高速計算システムの開発」が開始され、その中で、ジョセフソン接合素子の超高速・超低消費電力スイッチング特性を利用し、大規模なコンピュータを実現するための技術の開発が電子技術総合研究所（以下、電総研と記す）と民間企業4社（日立製作所、日本電気、富士通、三菱電機）において始められた。電総研では、同年7月に16名の正規職員研究者から成るジョセフソンコンピュータ技術特別研究室が編成され、Nb系薄膜を電極とするジョセフソン接合素子集積プロセス技術の開発、新しいタイプの論理・記憶回路の設計・試作等が行われた。そして、ETL-JC1と名付けられたコンピュータプロトタイプが設計・試作され液体He温度において正常に動作することが確認された。しかし、実用的なジョセフソンコンピュータの実現を見通せないまま特別研究室は1989年に解散し、通産省のプロジェクトも1990年に終了した。つまり当初の目的を果たすことはできなかったのである。しかし、その中で開発されたNb系薄膜を電極とするジョセフソン接合素子集積プロセス技術は野辺山宇宙電波観測所に技術移転され、我が国におけるミリ波・サブミリ波電波天文学の発展に大きく貢献することになった。また、電総研では小型冷凍機によって動作することが可能な高精度電圧発生システムが開発され、現在、産業技術総合研究所（以下、産総研と記す）において、我が国における電圧の国家標準を定めるために使用されている。

### 1. そのものの始まり

私がジョセフソン接合素子を利用した様々なデバイスの研究開発に携わるきっかけとなったのは、東北大学の先輩であった篠木藤敏さんからの誘いであった。私は1974年4月に電総研に入所したのであるが、その時の配属先は垂井康夫さんが室長をされていた電子デバイス部半導体デバイス研究室であった。その場所は東京都田無市にあった。当時は通産省のいわゆる「サンシャイン計画」が始まったばかりで私はシリコンウエハ中の少数キャリアライフタイムを非破壊的に計測する方法を検討するように命じられた。そこで、ウエハの一部に可視光レーザを照射し、その部分の少数キャリア密度を変化させ別に用意した赤外線レーザの反射率の変化を観測する方法を提案し、基礎的な実験を開始した。その研究がある程度まとまった1980年に、研究所が筑波に移転することになった。篠木さんから電話があったのは1981年の3月と記憶している。

当時篠木さんが所属されていた基礎部クライオエレクトロニクス研究室の早川尚夫室長と会って話を聞いて欲しいと言うものであった。

早川さんとお会いしたのは研究所の近くのとある喫茶店であった。彼の話は、超高速計算システムの開発を目的とする通産省の新しいプロジェクト（科学技術用高速計算システムの開発）が近々に開始されること、その中に、極低温（～4 K）で動作する超高速・超低消費電力のスイッチングデバイス、具体的には、ジョセフソン接合素子を用いた論理回路やメモリーの開発が含まれるということであった。

その当時、米国 IBM 社によりラッチ型の電流－電圧( $I$ - $V$ )特性（第 2 章で解説する）を有するジョセフソン接合素子を用いた超高速かつ超低消費電力で動作する論理回路、メモリー回路等の開発が行われていた。その目的は、半導体素子を利用するシステムでは実現することができない計算処理速度を持つ大規模なコンピュータシステムを実現することにあった。

通産省のプロジェクトには、1) ジョセフソン接合素子を用いてコンピュータシステムを実現するための要素技術の開発、2) 極低温で動作する HEMT 型 GaAs 素子を用いて超高速画像処理システムを実現するための技術の開発、及び 3) 従来の Si 半導体素子を用いて超高速演算を実現するための並列計算処理システム技術の開発が含まれていた。一方、その当時、郵政省の電気通信研究所において、ジョセフソン接合素子を用いた超高速デバイスに関する研究開発がすでに始められていた。

電総研では、上記 1) の目的のために、ハードウェアとソフトウェアに関する研究者 16 名が集められジョセフソンコンピュータ技術特別研究室が 1981 年 7 月に発足した。そのリーダーに早川さんが選ばれたのであった。筆者は早川さんの話に興味を持ち、1981 年 7 月に所属を電子デバイス部から基礎部に変更した上、特別研究室に参加した。

科学技術用高速計算システムの開発プロジェクトが 1981 年に開始されてから間もなくして大きなニュースが飛び込んできた。IBM 社がジョセフソン接合素子を用いたコンピュータシステムの開発を中止したというのである(1982 年)。しかし、その理由は必ずしも明らかにされなかった。その後間もなくして、郵政省の電気通信研究所もジョセフソンコンピュータ技術に関する研究開発を中止することを発表した。通産省では、ジョセフソンコンピュータに関する研究開発を継続するべきか中止するべきかの判断を早川さんに求めて来た。早川さんの出した答えは「継続すべき」というものであった[1]。その判断が正しかったかどうかは現在評価の分かれるところである。この原稿を書いている 2025 年までにジョセフソン接合素子を用いたコンピュータシステムは実現されていない。その事実からすれば、早川さんの判断は誤りだったということになる。しかし、特別研究室で開発された Nb 系薄膜（Nb 薄膜と NbN 薄膜）を電極とするジョセフソン接合素子集積技術は、我が国におけるミリ波・サブミリ波電波天文学の発展やコンパクトな電圧標準システムの開発に大きく貢献することになった。

## 2. Nb系薄膜を電極とするジョセフソン接合素子集積技術の開発

### 2-1. ジョセフソン接合素子の構造と電気的特性

ジョセフソン接合素子とは厚さ数 nm の絶縁体薄膜（あるいは常伝導金属薄膜）を2つの超伝導体で挟んだ構造を持つ素子である（図1参照）。簡略化されて、ジョセフソン接合あるいはジョセフソン素子と呼ばれることもある。本稿では、簡略化せずに、ジョセフソン接合素子と呼ぶことにする。

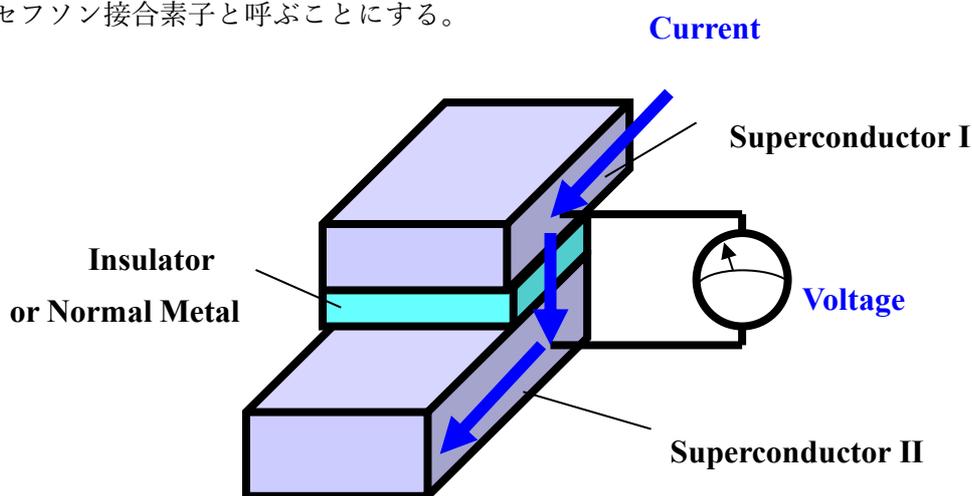


図1 ジョセフソン接合素子の構造

ジョセフソン接合素子の2つの超伝導体間に電流を流した時、間に挟まれた薄い層（“バリア”と呼ばれる）が絶縁体の場合と常伝導金属の場合とで異なった電流—電圧特性 ( $I$ - $V$ 特性) を示す（図2参照）。

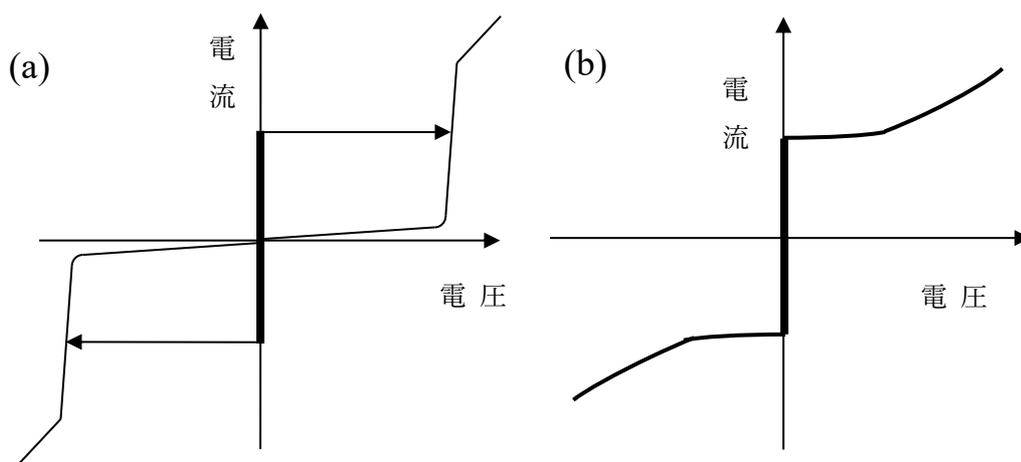


図2 ジョセフソン接合素子の電流—電圧特性

(a) バリアに絶縁体を使用した場合（ラッチ型の  $I$ - $V$ 特性）

(b) バリアに常伝導金属を使用した場合（オーバードンプ型の  $I$ - $V$ 特性）

## 2-2. IBMによるジョセフソン接合素子集積技術の開発

ジョセフソン接合素子を用いた超高速スイッチングデバイスの開発が IBM によって始められたのは 1960 年代後半であり、ジョセフソン接合素子の電極としては鉛合金 (Pb-In-Au 合金) 薄膜が用いられた。その理由は、鉛合金の融点が比較的低いために、蒸着法による成膜が可能であること、レジストステンスルを用いたリフトオフによって容易に電極パターンの形成ができることにあった。IBM の鉛合金ジョセフソン接合素子作製プロセスでは、下部電極の表面を酸素とアルゴン中の混合ガスプラズマ中で酸化することによって形成される厚さ数 nm の絶縁体層がバリアとして用いられていた。このため、素子を液体ヘリウム中に浸すと図 2(a)のようなラッチ型の  $I$ - $V$ 特性を示す。この特性が超高速・低消費電力のスイッチング素子としての機能をもたらすのである。

しかし、鉛合金薄膜は、機械的強度が低く耐水性も低いという欠点を持っていた。そのために室温と極低温間で往復させる、すなわち熱サイクルを加えると、素子の電気的特性が変化（多くの場合は、劣化）してしまうという難点があった。私は IBM 社がジョセフソンコンピュータの開発を断念した理由の一つは、その点にあったのではないかと推測している。

## 2-3. 電総研におけるジョセフソン接合素子集積技術の開発

早川さんが、ジョセフソン接合素子を用いたコンピュータシステム技術開発の継続を決断された理由の一つは、篠木さんが中心となって、窒化ニオブ(NbN)薄膜を電極とするジョセフソン接合素子集積技術の開発が電総研において進めてられていたからである。NbN 薄膜は機械的に硬い性質があり、それを電極に用いることにより熱サイクルに対して安定なジョセフソン接合素子を形成することができると期待されていた。

同じ理由から、世界中の多くの研究機関において、Nb 薄膜や NbN 薄膜などいわゆる Nb 系薄膜を電極とするオールハード・ジョセフソン接合素子集積技術の研究開発が行われていた。

Nb は元素の中で最も高い超伝導臨界温度( $T_c=9.2\text{K}$ )を有しており、スパッタリングや電子ビーム蒸着によって Si ウエハ上に容易に薄膜を作製することができる。しかし、酸素とアルゴンの混合ガス中で下部電極の表面をプラズマ酸化し厚さ数 nm の絶縁体層を形成し、その上に Nb 薄膜を堆積すると、望むような  $I$ - $V$ 特性を有するジョセフソン接合素子を作製することはできなかつた。その理由は、Nb が酸素と非常に結合し易い性質を持つために、上部電極堆積中にバリア中の酸素が上部電極内に拡散してしまい低級酸化物が形成されてしまうことにあった。

篠木さんが Nb 薄膜よりも NbN 薄膜を採用した理由は、適当な濃度の窒素ガスとアルゴンの混合ガスプラズマ中で Si ウエハ上にスパッタリング堆積される NbN 薄膜が Nb 薄膜よりも高い超伝導臨界温度( $T_c=14\text{-}15\text{K}$ )を持つことにあった。このことは、小

型冷凍機によって実現できる 10K 前後の温度においてジョセフソン接合素子を用いた様々なデバイスを動作させることを可能にする。

私は、特別研究室に参加して直ぐに篠木さんとチームを組んで、NbN 薄膜を電極とするジョセフソン接合素子集積技術の開発に取り組んだ。ポイントは2つあった。第一は、電極の微細加工をどのようにして行うかということ、第二は、バリアとして何を用いるかということである。

まず、電極の微細加工をどうするかという問題である。篠木さんは、スパッタリングによってウエハ上に堆積した ZnO 薄膜を 1%リン酸で部分的に溶解してステンシルを形成し、リフトオフによって NbN 膜の加工を行なっておられた。ZnO は人体に無害な物質であり、この方法は上手くいったが、加工精度の点で限界があった。そこで私は当時半導体素子の微細加工技術として採用され始めていた反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching: RIE) を NbN 膜の微細加工に使えないかと考えた。しかし、特別研究室には当然 RIE 装置は無かった。そこで、私は当時の光技術部オプトエレクトロニクス研究室の室長さん (名前はお忘れした) に装置をお借りできないかと相談に行った。当時は大らかな時代であり、汎用の RIE 装置があるので、こちらで使っていない時にどうぞと行ってくださった。しかし、使えたのは午前零時を回ってからであった。

NbN 膜を  $\text{CF}_4$  ガスプラズマ中で RIE してみると何とエッチングではなくデポジションが発生した。これには大変驚いた。当時の私は、RIE を行う前には必ずチャンバーを酸素ガスプラズマでアッシングしなければならないという常識を知らなかったのである。アッシングを行うと綺麗にエッチングすることができた。そして電極の微細加工精度は ZnO ステンシルを用いる場合に比べて格段に向上した。

次にバリアをどう作るかである。まず一番常識的な方法、つまり、下部電極表面を酸素ガスとアルゴンガスの混合気中でプラズマ酸化しバリアを形成した。これを NbN/NbO<sub>x</sub>/NbN 素子と呼ぶ。作製した NbN/NbO<sub>x</sub>/NbN 素子は、極低温 (液体 He 中) において、ギャップ電圧以下の電圧領域において比較的小さいリーク電流を持つラッチ型の  $I$ - $V$  特性を示した[2]。

問題は、熱サイクルに対して安定かどうかである。それを調べるために液体 He と室温間で数十回素子を出し入れしてみた。半日ほどかかったが、 $I$ - $V$  特性は全く変化しないことが確かめられた。

その後、幸坂 紳さんが中心となって、NbN/NbO<sub>x</sub>/NbN 素子を用い LSI 規模 (素子数 > 1,000) の集積度を持つ回路を作製するためのプロセス技術の開発を行なった[3]。そして、4 ビットジョセフソンコンピュータプロトタイプ ETL-JC1 のシーケンス制御に用いるチップ (SQCU チップ: ジョセフソン接合素子数 = 2,372) を作製し、液体 He 温度において正常に動作することを確認した。

一方、私と篠木さんは、より小さいリーク電流を持つオール NbN ジョセフソン接合素子を実現するために、バリアの素材として、シラン ( $\text{SiF}_4$ ) とアルゴンの混合気中での

プラズマ分解によって形成されるアモルファス Si 膜の採用を試みた(NbN/a-Si/NbN 素子) [2]。アモルファス Si 膜を採用した理由は、今ははっきりとは覚えていないが、篠木さんが Nb 酸化物よりもアモルファス Si 膜の方が上部電極の堆積に対して安定ではないかと考えられたからではないかと記憶している。しかし、NbN/a-Si/NbN 素子は、NbN/NbO<sub>x</sub>/NbN 素子とほとんど似通った *I-V*特性を示した。つまり、期待外れであった。次に、MgO ターゲットのスパッタリングによって形成される MgO 膜の採用を試みた(NbN/MgO/NbN 素子)。MgO 膜をバリアに採用した理由は、MgO が NbN と同じ結晶構造 (NaCl 型) を持ちかつほぼ同じ格子定数を有することにあつた。これらの性質のために、上部電極堆積中、比較的品質の高い NbN 膜の成長が行われることを期待したのであつた。NbN/MgO/NbN 素子は、リーク電流が明らかに小さい *I-V*特性を示した[4]。この特性を初めて観察した時はかなり嬉しかったことを覚えている。しかし、NbN/MgO/NbN 素子はジョセフソンコンピュータを構成するチップを作製するための基本素子として採用されることはなかつた。その理由は、次に述べる理想的な *I-V*特性を有する Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 素子の出現である。

#### 2-4. 理想的な *I-V*特性を有する Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb ジョセフソン接合素子の出現

1983 年にベル研究所の Gurvitch らによって、理想的な *I-V*特性を有するオールハードジョセフソン接合素子の作製が報告された[5]。Gurvitch らは、アルゴンガス中でスパッタリング堆積されたアルミニウム(Al)薄膜を酸素プラズマ中で酸化して形成される AlO<sub>x</sub> 膜をバリアとして採用した。AlO<sub>x</sub> 膜は化学的に非常に安定な物質であり上部電極用 Nb 膜の堆積中にバリア中の酸素原子が上部電極中にほとんど拡散しないものと考えられている。Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 素子は、熱サイクルに対して高い安定性を示すことも実験によって確かめられた。

Gurvitch らの報告を見た時は正直「あっ、やられた」と思った。しかし、NbN 膜を電極とするジョセフソン接合素子集積技術の開発は継続することにした。その理由は、NbN 膜を電極とするジョセフソン接合素子が小型冷凍機によって実現できる 10K 程度の温度において動作させることが可能であるという一点にあつた。

特別研究室では Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 素子の優れた *I-V*特性を無視することはできなかつた。仲川 博さんらによって Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 素子を利用した LSI 規模の集積度を持つ論理回路の作製プロセス技術の開発が行われた[3]。そして、ETL-JC1 を構成する論理演算チップ(RALU)、命令 ROM チップ(IROU)、データ RAM チップ(DRAU)の試作が行われた。

最終的に、Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 素子は電総研においても、通産省の「科学技術用高速計算システムの開発」に参加していた日立製作所、日本電気、及び富士通各社の研究開発グループにおいても、ジョセフソン論理集積回路や記憶集積回路を作製するための基本素子として採用されることになった。

## 2-5. ジョセフソンコンピュータ技術特別研究室の解散と通産省プロジェクトの終了

1987年に早川さんが突然名古屋大学工学部に教授として転出された。そして、高田進さんが基礎部クライオエレクトロニクス研究室長とジョセフソンコンピュータ技術特別研究室長に併任で就任された。その際、高田さんと同期で入所された篠木さんは青森県の産業技術開発センターに所長として転出された。

1988年に、ジョセフソンコンピュータ技術特別研究室は解散され、クライオエレクトロニクス研究室のメンバーは全員電子デバイス部に新設された超伝導エレクトロニクス研究室に異動になった。ジョセフソンコンピュータ技術特別研究室が突然解散された理由は公式には明らかにされていない。しかし、ラッチ型の  $I$ - $V$ 特性を有するジョセフソン接合素子を用いてコンピュータシステムを実現する見通しが立たなかったことは明らかであった。結局、IBM が下した判断が正しかったのである。通産省の「科学技術用高速計算システムの開発」も1990年に終了し、この年をもってラッチ型  $I$ - $V$ 特性を有するジョセフソン接合素子を用いて超高速コンピュータを実現するための研究開発は全て終了した。

しかし、電総研における Nb 系薄膜を電極とするジョセフソン接合素子集積技術開発の成果は、この後に述べるように我が国におけるミリ波・サブミリ波電波天文学の発展に大きく貢献することになった。また、第3章で述べるように、液体ヘリウムフリーの任意高精度電圧発生システムの開発を可能にした。

## 2-6. 野辺山宇宙電波観測所への技術移転

電総研における Nb 系薄膜を電極とするジョセフソン接合素子集積技術の開発がミリ波・サブミリ波電波天文学の発展に繋がるきっかけとなったのは、1984年に野辺山宇宙電波観測所の稲谷順司さんが、早川さんのところに訪れたことにある。野辺山宇宙電波観測所は1982年に開所されたばかりであり、当時世界最大の直径45mのアンテナを持つ電波望遠鏡を完成し、気鋭の研究者が集まっていた。その中で稲谷さんは、受信器開発を任されていた。そして、受信器素子の候補として、1979年に Tucker の理論によって予言され、バークレイ及びベル研究所の実験によって、その超低雑音性能が実証されていた SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor) ミキサと呼ばれる素子を作ろうとされていたのである[6]。SIS ミキサはラッチ型の  $I$ - $V$ 特性を有するジョセフソン接合素子そのものだった。稲谷さんは電総研においてオールハードのジョセフソン接合素子が作られていることをどこかで知り、作製法を学びたいと早川さんに申し出られたのである。早川さんは「いいですよ」と即答された。そして、私が稲谷さんに紹介されたのである。それから約1年半の間、稲谷さんは毎週末野辺山から筑波に車で来られ、オールハード素子の作製を体験されたのである。その熱心さには、私も驚いた。そして、稲谷さんと共同研究されていた木更津高等専門学校の小平眞次さん(教授)も

筑波に来られ、オールハード素子の作製に参加された。稲谷さんは私と同学年であり、小平さんは4学年上であったがとても気さくな方であった。私の後輩でNbN素子の開発を一緒に行なっていたいただいた神代 暁さんと4人で時々松見公園近くのレストラン街に行き、色々なことを議論したことを思い出す。また、稲谷さんに野辺山で行われた研究会に何回か招待され、オールハード素子に関する講演を行ったことを思い出す。野辺山は、冬にあまり雪が降らないことで有名であった（それが、天文観測用の望遠鏡が設置された理由であると聞いた）。しかし、非常に寒かったことを思い出す。

稲谷さんにオールハード素子を使っていたいただいたのはとても嬉しかったが、一つだけ残念なことがあった。それは、電総研オリジナルのNbN膜を電極とする素子ではなくNb/AlO<sub>x</sub>/Nb素子が受信器素子として採用されたことにある。しかし、それはSISミキサとしては当然の選択であったから、何のわだかまりも無かった。稲谷さんは、野辺山にNb/AlO<sub>x</sub>/Nb素子を作製するための設備を整えられ、三菱電機から移られた野口卓さんと共にミリ波・サブミリ波観測用受信器の開発を進められた。そして、お二人の成果が、野辺山宇宙電波観測所の数多くの成果を生み出す基盤となった。さらに、近年、東アジア、北米、及び欧州の国際共同プロジェクトによりチリのアタカマ砂漠に建設された大型電波干渉計(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array : ALMA)における日本チームによるSISミキサを用いた受信器開発に結びついたのである。

### 3. NbN 薄膜を電極とするジョセフソン接合素子を用いた高精度電圧発生システムの開発

#### 3-1. きっかけ

電総研および産総研では電圧の国家標準の発生が義務付けられており、1977年からジョセフソン接合素子の示す周波数-電圧変換特性を利用してそれが実現されてきた。しかし、残念なことに当時は、米国製の超伝導チップが採用されていた。その要因は、電総研ではコンピュータ応用を目的として超伝導チップの開発が進められている一方、電圧標準への応用を目的とした素子開発は行われていなかったことにある。1996年に高田進さんが埼玉大学に教授として転出され、私が超伝導エレクトロニクス研究室長を引き継ぐことになった。その時せっかく独自に開発したNbNジョセフソン接合素子集積技術があるのだから、何とか高精度電圧の発生に応用できないだろうか考えた。それで、当時、標準研究部門から超伝導エレクトロニクス研究室に転出されて来ていた佐々木仁さんに相談してみた。すると、近年新しい電圧標準の方式が提案されているので、それに応用してみてもどうかと言うのである。

#### 3-2. ジョセフソン効果を利用した新しい電圧標準

1995年にNIST(National Institute of Standards and Technology)のHamiltonらによってプログラマブルジョセフソン電圧標準(Programmable Josephson Voltage Standard: PJVS)と呼ばれる新しい高精度電圧の発生方法が提案された[7]。従来の方法に対する

PJVS の利点は、任意の電圧を短時間 (1 ミリ秒以下) で発生させることが可能なことにある。この特徴によって、広い測定レンジを有するデジタルボルトメーターの校正や商用交流電圧の高精度波形の発生などが可能になると考えられた。ただし、PJVS に適用可能なジョセフソン接合素子はラッチ型の  $I$ - $V$  特性ではなくオーバードンプ型の  $I$ - $V$  特性 (図 2 の (b)) を持つ必要があった [8]。

ここで PJVS の原理について簡単に説明する。図 3 に示すように 2 の  $n$  乗 ( $n=0,1,2,\dots$ ) 個の直列に接続されたオーバードンプ型ジョセフソン接合素子に独立にバイアス電流を供給し、左端からマイクロ波を導入すると、マイクロ波の周波数で決定される高精度電圧が区分された素子群に発生する。アレイ全体に発生する電圧の値は、バイアス電流を ON/OFF することにより任意に選択することが可能である。つまり、図 3 の回路は DA 変換器として働く。

## Programmable Josephson Voltage Standard (PJVS)

Hamilton et al. 1995

オーバードンプ型ジョセフソン接合を用いた DA 変換器

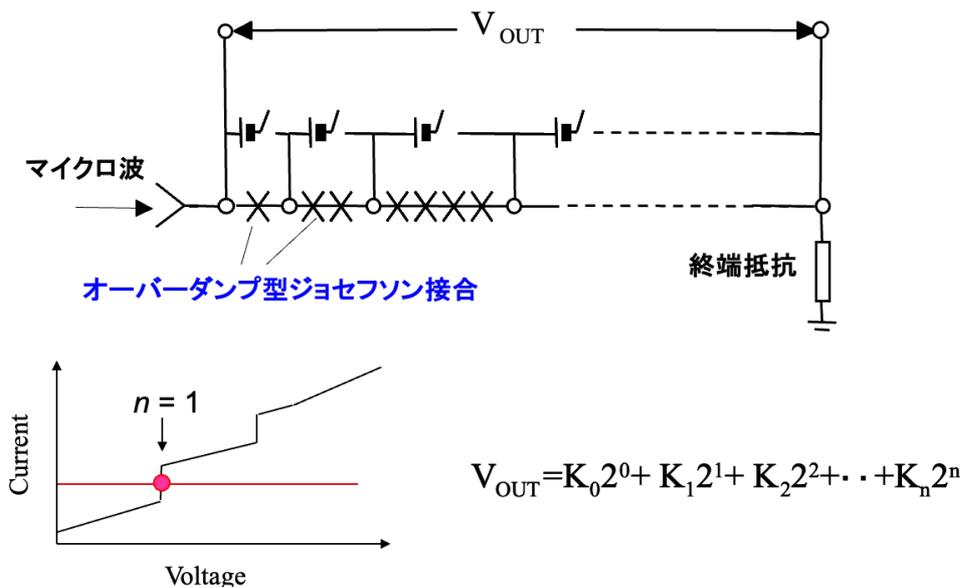


図 3 プログラマブルジョセフソン電圧標準(PJVS)の原理

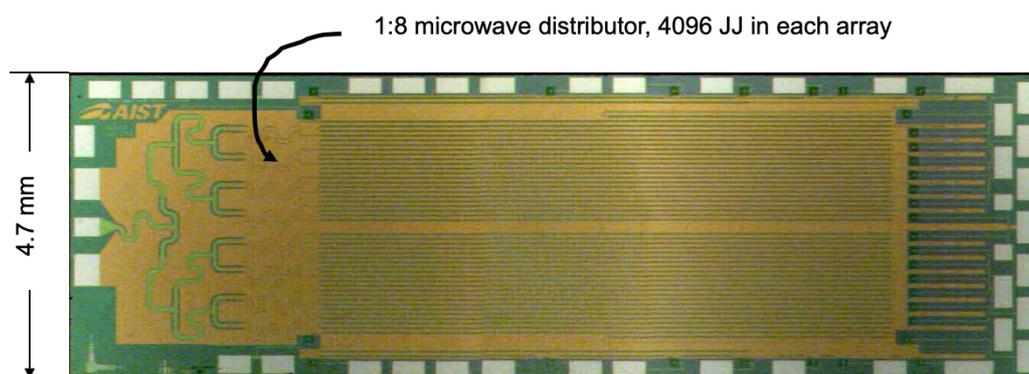
### 3-3. NbN ジョセフソン接合素子を集積した PJVS チップの開発

オーバードンプ型の  $I$ - $V$  特性を持つジョセフソン接合素子を作製するために、窒素ガスとアルゴンガスの混合気中でのスパッタリングによって形成される窒化チタン (TiN) 膜をバリアとして採用することを試みた。その理由は、スパッタリングによって下部電極上に堆積した TiN 膜が極低温においても金属的な伝導性を示すことにある。また、TiN が電極に用いる NbN と同じ窒化物でありかつ格子定数がほぼ同じであることから

歪みの少ない積層構造が得られると期待したことにある。結果的に期待通りの  $I$ - $V$ 特性とウエハ上に集積した数千個から数万個の素子において高い均一性を得ることができた。

図4に最初に試作した最大1Vの高精度電圧を発生させることが可能なPJVSチップの顕微鏡写真を示す。このチップには32,768個のNbN/TiN/NbNジョセフソン接合素子から構成されるDA変換器が2個搭載されている。小型冷凍機により得られる10K付近の温度において、周波数16GHzのマイクロ波を左端のパッドから導入することによって、高精度電圧が得られることを確認することができた。なお、このDA変換器チップの設計にあたってはNISTのSam Benz氏から多大のご協力をいただいた。今においても彼の好意に感謝している。

## AIST's Dual output 1-V chip



**Parallel 10-bit D/A converter**  
**chip size 14.7mm x 4.7mm**  
**32,768 junctions each DAC**  
 **$f = 16$  GHz**

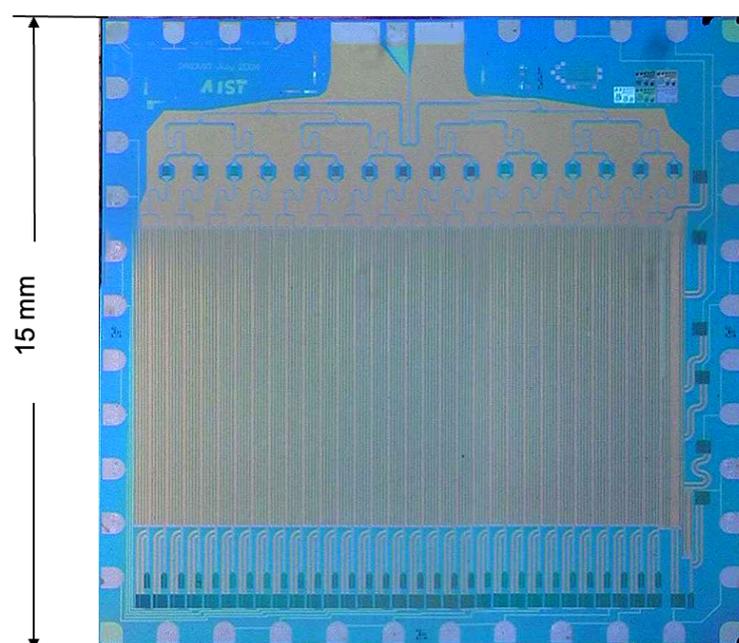
図4 最初に試作したDA変換器チップの顕微鏡写真

### 3-4. 液体ヘリウムフリー高精度電圧発生システムの実用化

次のステップは10Vの高精度電圧を発生することである。10Vがなぜ重要かと言うと、半導体素子の動作電圧が一般に1Vから10Vの範囲にあることに帰着する。このため、さらに大規模な集積度を持つDA変換器チップの作製に挑戦した。しかし、佐々木さんが10Vチップを設計してみると、327,680個のNbN/TiN/NbNジョセフソン接合素子を一つのチップ上に集積するのはどうしても無理だというのである。そこで私は2つのNbN/TiN/NbN素子を縦に積み上げて、NbN/TiN/NbN/TiN/NbN素子を作ってみる

ことを提案した。これが上手くいけば、チップのサイズをかなり縮小することが可能になる。しかし、一つ問題があった。縦に積み重ねた NbN/TiN/NbN 素子の  $I$ - $V$ 特性を同じに作製することができるかどうかという問題である。もうそれには上下の TiN バリアの作製条件を色々変えて試行錯誤を試みるほかない。何十個かの素子を作製しては、特性評価を行った。するとある作製条件において、上下の素子で同じ特性を持つ NbN/TiN/NbN/TiN/NbN 素子を再現性良く作製することができた。そのようにして作製した 10V チップの顕微鏡写真を図 5 に示す。

## AIST's 10-V chip



### 327,680個のNbN/TiNx/NbN接合を集積 (f = 16 GHz)

図 5 10V 発生用 DA 変換器チップの顕微鏡写真

現在、産総研では、山森 毅さんによって DA 変換器回路の設計を改良して作成された新しい 10V チップを採用した液体ヘリウムフリーの高精度電圧発生システムが電圧の国家標準を定めるために使用されている。液体ヘリウムが不要であることは実用上様々な点で有利である。例えば、世界的なヘリウムガスの供給不足が発生しても問題がない。また、定期的に液体ヘリウムを供給する必要がないので、メンテナンスの負担が少ない。

#### 4. まとめ

超高速かつ低消費電力で動作するコンピュータシステムの実現を夢見て、我が国において 1970 年代半ばに始められたジョセフソンコンピュータ技術の研究開発は、革新的なコンピュータシステムの実現に繋がることはなかった。その理由として、1) 磁束量子を超伝導ループ内に閉じ込めるという記憶回路の方式では微細化に限界があること、2) 大規模な集積度を持つジョセフソン論理・記憶回路に対して室温から大電流を流す必要がありそれが技術的に困難であること等が挙げられる。

しかし、産総研で開発された Nb 系薄膜を電極とするジョセフソン接合素子集積プロセス技術は、野辺山宇宙電波観測所に技術移転され、超低雑音のミリ波・サブミリ波受信器を開発することを可能にした。このことによって、我が国の電波天文学は大いに発展した。

通産省のプロジェクトの中で開発された NbN 膜を電極とするジョセフソン接合素子集積技術を用いて 0V から 10V の任意の高精度電圧標準を発生させることが可能なプログラマブルジョセフソン電圧標準用チップが作製された。このチップは小型冷凍機に搭載して動作させることが可能であり、現在産総研において我が国の基準電圧を定めるために使用されている。

私は、このチップを海外の国立研究機関でも使用してもらえないだろうかと考え、2004 年 11 月に産総研の第 2 事業所内に設立された技術移転ベンチャー（アイカンタム株式会社、代表取締役 渡辺淳一氏）に参加して、インドネシアの国立研究所(Puslit KIM-LIPI: KIM-LIPI)への売り込みを図った。私は佐々木さんと連れ立ってジャカルタの郊外にある KIM-LIPI を訪れシステムの性能に関する説明を行った。その努力が報われ、ジョセフソン高精度電圧発生システムを 1 式納入する契約を取り付けることに成功した。その後、日本から送った装置の部品を組み立てるため、さらに、装置の性能試験を行うために何度も KIM-LIPI を訪れた。インドネシアはとても親日的な国であり、KIM-LIPI の職員の方々も皆親切な人ばかりで、楽しい思い出が多く残っている。しかし、残念ながら納入した装置は現在稼働していないと聞いている。最終的にお役に立てなかったのは大変申し訳ないと今でも思っている。

現在、液体ヘリウムフリー高精度電圧発生システムの販売は、長野県佐久市にある株式会社サンジェム（代表取締役 小谷野信一氏）において行われている。これまでに国内の 1 つの大学と 1 つの民間企業に納入実績があると聞いている。海外の研究機関も含め液体ヘリウムフリー高精度電圧発生システムを広く普及させるためには、10V-DA 変換器チップの安定的な生産が何よりも必要であり、そのための設備の維持と要員の確保が産総研において今後も継続して行われることを期待して本稿の結びとしたい。

## 謝辞

本稿を執筆するに当たり、私がお世話になった数々の先輩研究者の方々、特に、早川尚夫氏（故人）、篠木藤敏氏（故人）、高田 進氏（故人）、および小柳正男氏に感謝を申し上げます。また、電総研時代、産総研時代を通して共に研究開発を行なっていただいた幸坂 紳氏、佐々木仁氏、神代 暁氏、及び山森 毅氏に感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] 早川尚夫、「超伝導デバイスの電総研における研究開発」AIST 研究秘話 **84** (2021 年)
- [2] 電子技術総合研究所彙報「ジョセフソンコンピュータ技術特集」第 48 巻、第 4 号、1984 年 4 月
- [3] 電子技術総合研究所彙報「ジョセフソン集積回路技術特集」第 53 巻、第 7 号、第 8 号、1989 年 8 月
- [4] A. Shoji, M. Aoyagi, S. Kosaka and F. Shinoki: Appl. Phys. Lett. **46**, 1098 (1985).
- [5] M. Gurvitch, M.A. Washinton and H.A. Huggins: Appl. Phys. Lett. **42**, 472 (1983).
- [6] 野口 卓、「超伝導 SIS 素子による電波検出技術」計測と制御 第 39 巻、第 6 号、395-400 (2000 年)
- [7] C.A. Hamilton, C.J. Burroughs and R.L. Kauts: IEEE Trans. Instrum. Meas. **44**, 223 (1995).
- [8] 東海林彰、「超伝導電圧標準の基礎」応用物理 第 72 巻、第 12 号、1546-1549 (2003 年)

## 著者略歴

氏名：東海林 彰 (Akira Shoji)

- 1974 年 通商産業省工業技術院 電子技術総合研究所に入所  
電子デバイス部半導体デバイス研究室に配属
- 1981 年 基礎部クライオエレクトロニクス研究室に配置換え  
ジョセフソンコンピュータ技術特別研究室に併任
- 1988 年 電子デバイス部超伝導エレクトロニクス研究室に配置換え  
ジョセフソンコンピュータ技術特別研究室の併任解除
- 1996 年 電子デバイス部超伝導エレクトロニクス研究室長に就任
- 2001 年 独立行政法人産業技術総合研究所に配置換え  
エレクトロニクス研究部門に所属
- 2009 年 産業技術総合研究所を定年退職

## 受賞歴

- 1986 年 第 19 回市村賞貢献賞 (連名)：「高臨界温度ジョセフソン接合素子の開発」

受理日 令和7年8月12日