成果報告書

「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」

（新フォトカソード開発及び高周波超伝導空洞用入力カプラーの開発）

平成２３年１１月

国立大学法人東京大学

様式第20

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人東京大学が実施した平成２２年度「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」（新フォトカソード開発及び高周波超伝導空洞用入力カプラーの開発）の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

超伝導高周波加速器技術とレーザーパルス蓄積技術の融合によって、ポストゲノム時代の生命科学研究、ナノ構造解析、創薬、医療診断、マイクロリソグラフィへの利用を画期的に飛躍させる軟X 線から硬X 線領域の小型高輝度X 線発生装置（10m × 6m 程度）を実現する。本装置実現のために、高品質大強度電子ビーム生成装置、大強度・高電界超伝導高周波加速装置、高品質短パルス大強度レーザー蓄積装置、ミクロン精度での電子ビーム軌道制御技術及び、レーザー光路精密調整といった技術の実用化を図る。よって、超伝導高周波加速器技術を使った5 nm～0.025 nm 波長領域の小型高輝度X 線発生装置の開発とその実用化に必要な基幹技術の確立を行うことを目的とする。

さらに大強度安定化に必要な次の技術開発を行う。500～750kV 数十mA の高電圧DC 電子源開発、高性能光L-band RF Gun 開発、小型高信頼性L-band 高周波源開発および３次元４枚ミラーリング光蓄積装置開発を行う。これにより，生成するＸ線輝度を格段に高くすると同時に，レーザー光の偏光を高速で制御することによってのみ可能な世界でも特筆すべき高速可変偏光小型軟Ｘ線源を実現し，「軟Ｘ線領域における円二色性光源」として実用化を図る。

このため、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、国立大学法人東京大学、独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人広島大学、学校法人早稲田大学、東芝電子管デバイス株式会社及び株式会社日立ハイテクノロジーズは共同で業務を行う。

国立大学法人東京大学では、小型高輝度光子ビーム源装置の新フォトカソード開発及び高周波超伝導空洞用入力カプラーの開発を実施する。

2.　平成２２年度（報告年度）の実施内容

2.1　実施計画

2.1.1　新フォトカソード開発

前年度は、カードリッジ式光陰極高周波電子銃を用いて、可視光領域のレーザーで駆動できる、Na_2KSb 光陰極の試験を行った。可視光レーザーで 2nC の電子バンチの発生に成功したが、量子効率の劣化が紫外領域のそれに比べて大きいことが測定された。実用的なレベルを目指すために、今年度はアンチモンベースの陰極製膜を MBE 装置を用いて行い、残留ガスや真空度などによる陰極劣化のメカニズムを子細に検討する予定である。また、高周波電子銃の熱問題解決のための、電磁熱設計はほぼ終了し、今年度は、昨年度導入した新端板を用いて、ビーム試験を行う予定である。

2.1.2　高周波超伝導空洞用入力カプラーの開発

前年度は、セラミック窓（cold 窓）の改良を行い、ローパワーテストで改良窓の共鳴モードが 1.3GHz から設計通りにずれていることを確認できた。また、断熱槽を用いて cold 窓の液体窒素温度での冷却試験を行った。今年度は、この改良 cold 窓のハイパワーテストを行い、その結果をもとに高周波設計の方針を決定する。同時に、昨年度に行った cold 窓の液体窒素冷却実験の結果をもとに熱設計の方針を決定する。また、入力カプラー実機の設計製作に向けて、カプラーの機械的特性やクライオモジュールへの組込み部分の設計についても検討する。これらの検討結果をもとに、実機１台分の cold 窓と warm 窓の製作を行う。それらの性能評価試験も行う予定である。

2.2　実施内容(成果)

2.2.1 新フォトカソード開発

2.2.1.1 本研究の概要

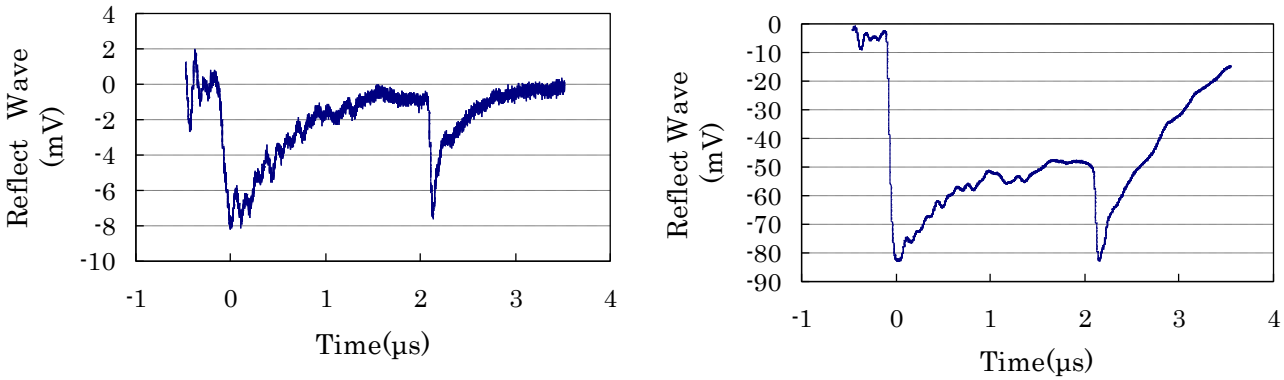
電子線形加速器カートリッジ式フォトカソード高周波電子銃に使用されているレーザー駆動高輝度高周波電子源に関する研究開発が行われているが、端板改良により熱問題に対する周波数の安定化を実現し高精度なビーム発生を目指し電子線形加速器使用後カートリッジの表面分析を行っている。高周波電子銃において反射波の乱れ及びビームエネルギー低下等の問題について冷却管付き端板を電子銃加速空洞における電磁熱解析による反射波の改善、ビームエネルギーの向上、飽和電荷量の増加等が見られ電子銃の電磁熱由来の問題を解決することができ電子銃の性能向上に繋がったと言える。

2.2.1.2 本研究の背景

低エミッタンスかつサブピコ秒からフェムト秒の極短パルス電子ビームを生成可能なフォトカソード高周波(RF)電子銃はリニアコライダーや次世代放射光源であるX線FELへ利用されており極短時間現象解明のためのポンプ&プローブ実験用の電子銃として有用である。電子ビーム発生用ポンプレーザーと現象測定用プローブレーザーに同光源を用い高精度の同期が可能になる。高周波の空洞印加により陰極表面に約100 MV/m 程度の高電場を印加し、電子源から放出された電子を相対論的領域まで加速してサブピコ秒からフェムト秒の超短パルスかつ低エミッタンスの電子ビームを発生させる。フォトカソードRF電子銃は駆動レーザーを共振空洞内のカソード面に入射させることにより光電子を発生させ高周波電場にて加速し電子パルスビームを発生させる。東京大学原子力専攻ライナック研究施設に設置されているS-bandの18MeV Linac (18L)ではサブピコ秒からフェムト秒時間領域の現象、特に放射線誘起反応初期過程の解明を目的としたポンプ&プローブ方式の高時間分解能パルスラジオリシスシステムが構築されておりカートリッジ型フォトカソード高周波電子銃が使用されている。本研究施設では0.3 TWチタンサファイアレーザー(基本波800 nm)の3倍高調波(266 nm,4.6 eV)をフォトカソード励起用レーザーとして用いてきたが3倍高調波への変換効率は本施設では約2％程度でありシステムの安定化・小型化の観点から可視光領域である2倍高調波で駆動可能なフォトカソードの開発が必要である。本研究では、長時間運転可能なカソード開発を目指し可視光レーザー駆動可能性のあるNa_2KSbに注目し高周波電子銃におけるビーム特性試験を行っている。

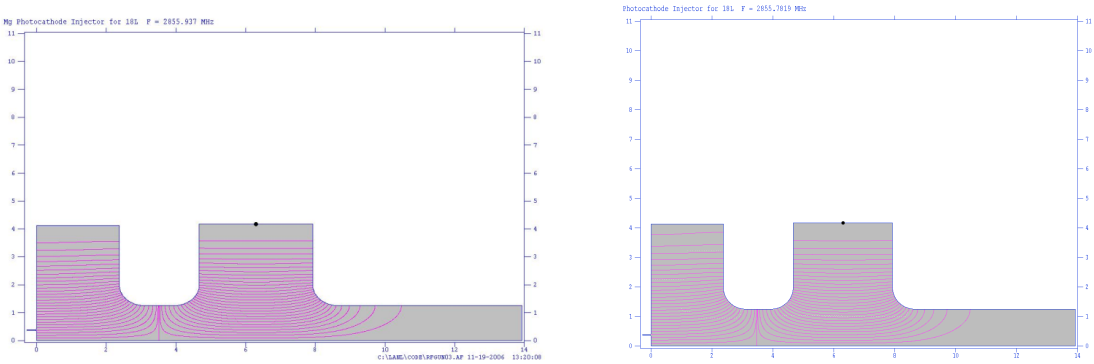
2.2.1.3 高輝度光陰極高周波電子銃新端板ビーム発生実験結果

空洞に導波管からマイクロ波を供給した際、空洞に入射マイクロ波パルスと同じ電力が満たされるまでは時間がかかる。そのため空洞からの反射波はパルスの供給の始めに極大になり空洞内に電力が蓄積するに従い減少し、パルスの終わりに空洞内の電力が極大化する。高周波を 2μs、10pps 印加で運転しているが、図 1-1 に高周波出力の違いによる反射波形、図 1-2 に旧端版の高周波印加前後の共振モードの変化を示す。Na_2KSb カソードは高周波電子銃のような開放系高周波場における使用例が無いため高周波電子銃における挙動を確認するため特性試験を行う必要があるが高周波の反射波が 0 にならず蓄積電力量が図 1-1(b)で 2 つのピーク間の平坦部の値がゼロにならず約 50%に留まり加速管後のエネルギーが設計値 22MeV より低い 20.8MeV であり高周波電子銃の電場が約 70%であり飽和電荷量が 3.1nC である。高周波印加時、空洞内に流れる壁電流によって生じるジュール熱による空洞の反射特性の乱れと予測できる。端板部分の温度上昇が大きく(+11.421℃)端板部分に冷却部が必要なことがわかる。高周波印加による温度上昇が原因で空洞容積が大きくなり共振周波数に 156kHz のずれが生じている。現在 18L の Q 値は 8500 であるため共振周波数の半値半幅は 165kHz であり空洞内蓄積電力 52%、空洞内電場強度 72%である。



(a) 高周波出力0.7MW　　(b) 高周波出力7MW

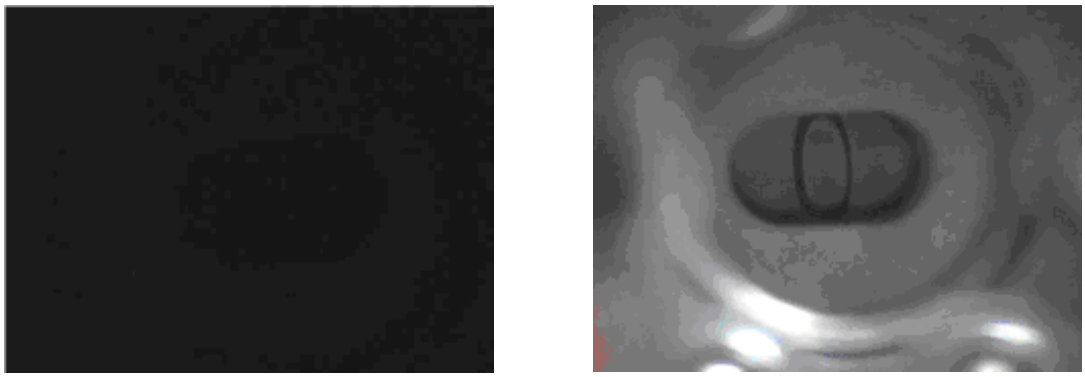
図1-1. 反射波の乱れ: 2つのピーク間の平坦部の値が0の時全高周波電力が蓄積されることになる



(a) 高周波印加前　　(b) 高周波印加後

図1-2. 旧端板の高周波印加前後の共振モードの変化

カートリッジ式交換システム導入端板を作製の際、図 1-3 に示すように交換システム接続部および高周波電子銃空洞接続部に強い機械的負荷がかかるため全体的に SUS が多くなるよう設計された。SUS は銅に比べ熱伝導率が小さく熱伝導率の大きい物質で端板構成することが望ましいと考えられ新端板に追加する冷却効果を十分に得るため銅部分比率が多くなるように設計した。新端板は銅の割合を増加することにより冷却管を端板の外壁に通す単純な形で十分な冷却効果が期待でき、表 1-1 及び図 1-4 に示すように高周波印加前後の周波数変化に改善が見られた。

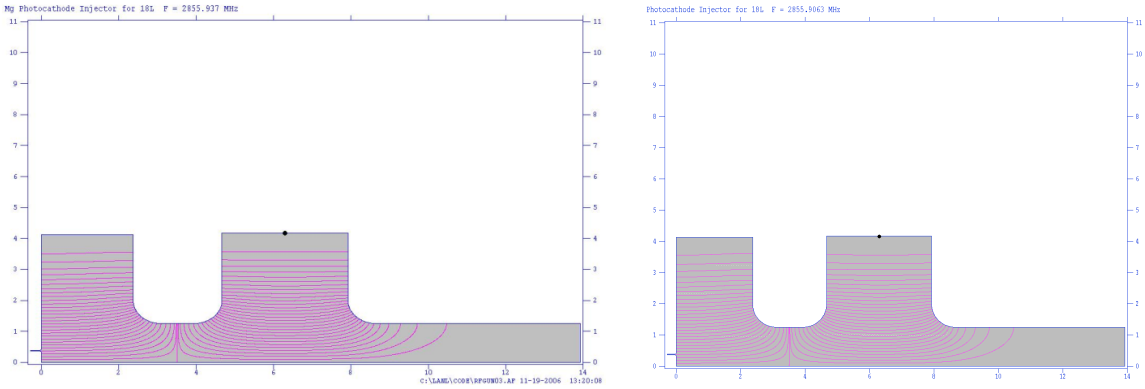


(a) エージング中　　(b) ビーム試験中

図 1-3. エージング中及びビーム試験中における陰極表面での放電の様子。カソードプラグにそって放電が見られる。

表1-1. 新端板の高周波印加前後の周波数変化

	高周波印加前 [MHz]	高周波印加後 [MHz]	差 [kHz]
旧端板	2855.937	2855.781	156
新端板	2855.937	2855.906	31



(a) 高周波印加前　　(b) 高周波印加後

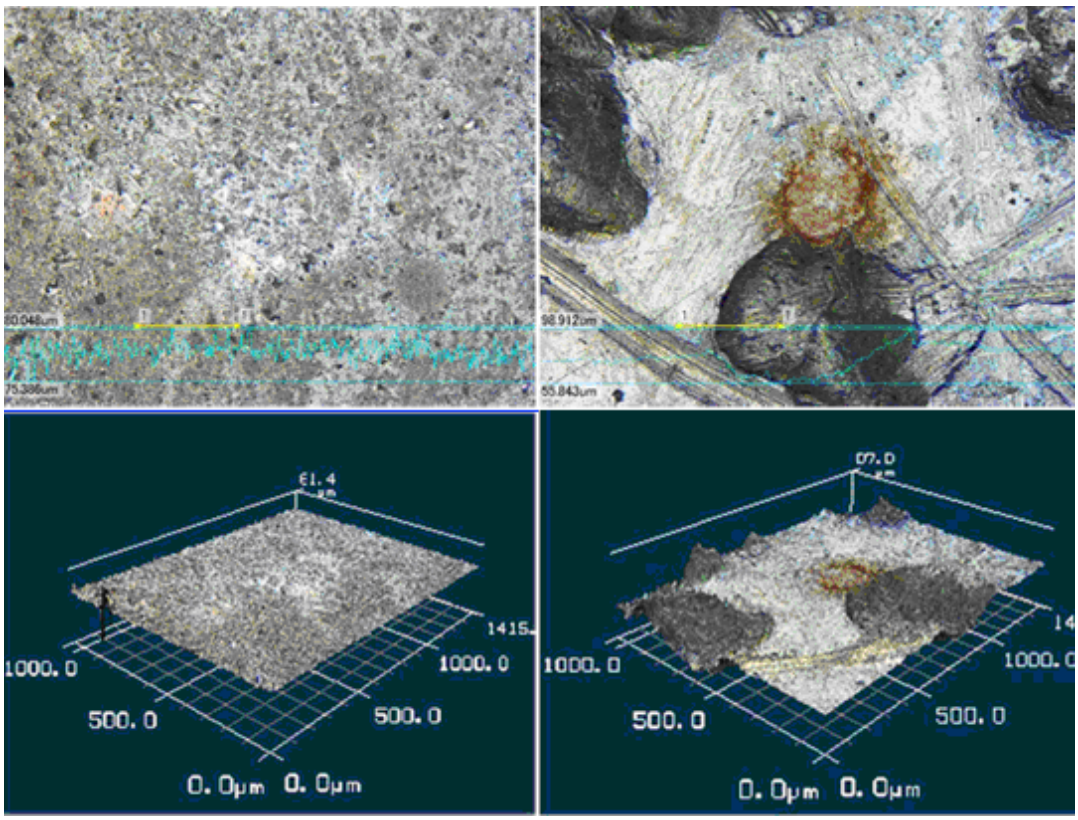
図1-4. 新端板の高周波印加前後の共振モードの変化

2.2.1.4. Na_2KSbのビーム試験後フォトカソード表面分析

光電子増倍管光電面に使用される Na_2KSb はバンドギャップ 1.0 eV、仕事関数 2.0[eV]の半導体材料であり金属系光陰極や Cs-Te 光陰極と比べて小さい特徴を持ち Ti;Sa レーザーの 2 倍高調波(400 nm,3.1 eV)でも駆動可能と期待されている[1]。オフライン試験において 500 nm 帯の入射光に対して 10%以上の高い量子効率を有することが報告されている[2]。ビーム発生に表面粗さが重要なパラメーターの一つであるため、Na_2KSb フォトカソード表面についてレーザー顕微鏡による観察を行い JIS-B0601 に基づく表面粗さ分析を行った。表 1-2 及び図 1-5 に示すように Cs_2Te カソード表面に深さ約 20nm 程度の黒い穴が局所的に形成されていることが観察され、Na_2KSb カソード表面については表面粗さが比較的小さいことが明らかになった。

表 1-2. Na_2KSb と Cs_2Te の Ra(算術平均粗さ)比較

	Ra (算術平均粗さ) [nm]	クレーター (20nm程度)
Cs_2Teカソード	5.559	点在
Na_2KSbカソード	0.677	なし

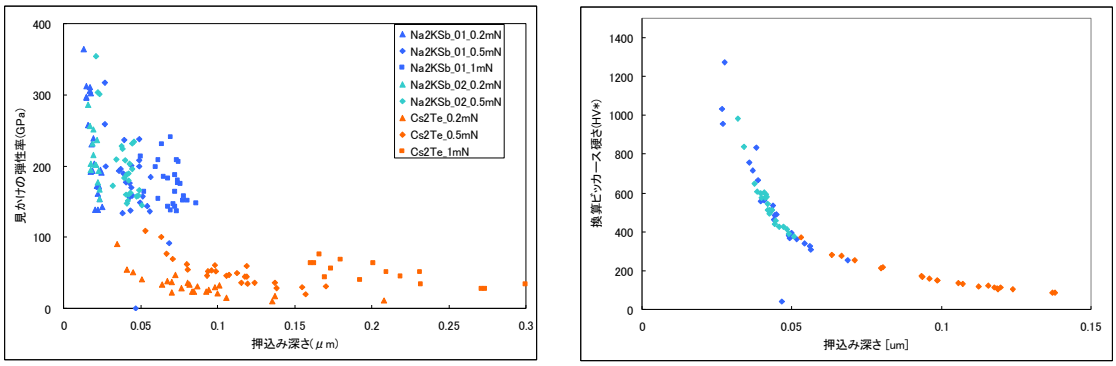


(a) Na_2KSbカソード　　(b) Cs_2Teカソード

図1-5. 光電面レーザー顕微鏡像 Na_2KSb表面よりCs_2Te表面の起伏が大きい

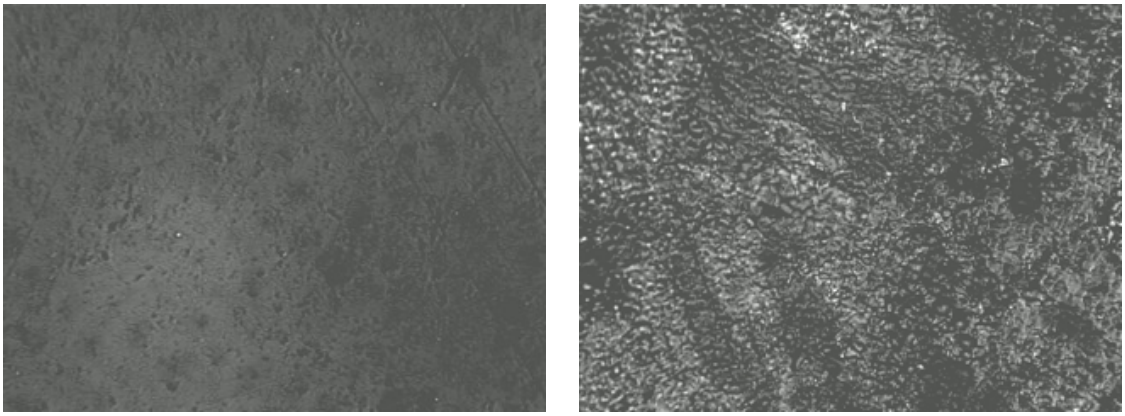
2.2.1.5. ナノインデンター試験結果

ナノオーダー光電面半導体薄膜の破壊力学的物性値を調査する目的で、ISO-14577-1 に基づく超微小硬度計による見かけの弾性率及び換算ビッカース硬さと押し込み深さの関係を測定した[3]。押しこみ弾性率は押しこみ硬さの接線の傾きから求めることができ弾性率に相当すると定義される。押し込み深さは 5-50 nm 程度とし 0.5 mN 荷重一定試験を行い、押込み深さは Na_2KSb で 50 nm 程度、Cs_2Te で 50-100nm 程度とした。図 1-6, 7 に示すように Na_2KSb は Cs_2Te より硬い可能性があり、使用前後での Na_2KSb の硬さに大きな差は見られないが、使用後放電が不均一に発生するため Na_2KSb 硬さのばらつきが大きくなる可能性がある。



(a) 見かけの弾性率と押し込み深さ　　(b) 換算ビッカース硬さと押し込み深さ

図1-6. 見かけの弾性率と換算ビッカース硬さの押し込み深さ依存性

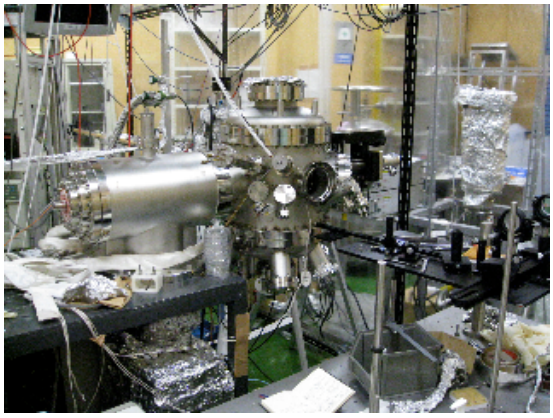


(a) 光学顕微鏡による表面観察結果 (Na_2KSb)　　(b) 光学顕微鏡による表面観察結果 (Cs_2Te)

図1-7. 光学顕微鏡による表面観察結果 (a) Na_2KSb、(b) Cs_2Te

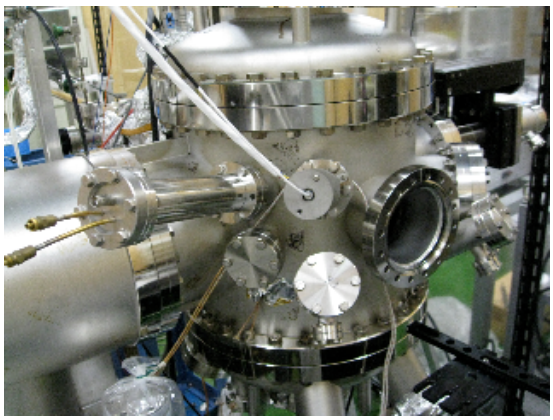
2.2.1.6. MBE装置のチャンバー作製について

日本原子力研究開発機構 ERL グループ所有 MBE 装置の立ち上げ及び調整を行った。具体的には図 1-8 に示すように真空度の高度化、リークチェック、ベーキング、成膜装置調整、測定系調整、ヒーターアッセンブリ、クヌーセンセル等の設置調整等を行った。



(a) MBE装置外観:
中央がMBE成膜チャンバー本体、
左側円柱部分がサブリメーションポンプ部分

(b) チャンバー内部:
中央金色部分が膜厚計ヘッド、
中央右寄り銀色直方体部分がヒーターアッセンブリ



(c) MBE成膜チャンバー本体:
中央ポートがエクストラクションゲージ、
中央左側ポートが膜厚計導入ポート及びその冷却系

(d) クヌーセンセル外観:
Cs及びNa等のアルカリ原子ビームを超高真空中にて発生させる

図1-8. MBE装置立ち上げの様子
(a) MBE装置外観、(b) チャンバー内部、
(c) チャンバー本体、(d) クヌーセンセル外観

2.2.1.7. まとめ

高周波電子銃において反射波の乱れ・ビームエネルギーの低下等の問題について冷却管付き端板を電子銃加速空洞における電磁熱解析にもとづいて設計・製作しインストールを行い、反射波の改善、ビームエネルギーの向上、飽和電荷量の増加等が見られ電子銃の電磁熱由来の問題をほぼ解決することができたと言える。カードリッジ式光陰極高周波電子銃を用い可視光領域レーザー駆動可能なNa_2KSb光陰極の試験を行い可視光レーザーで2nCの電子バンチ発生に成功したが、量子効率低下が紫外領域のそれに比べて大きく実用的レベルを目指すために今年度はアンチモンベース陰極製膜用MBE装置を用い陰極劣化のメカニズム検討を行った。Cs_2Teフォトカソード表面についてレーザー顕微鏡による観察を行いJIS-B0601に基づく表面粗さ分析を行い表面に深さ約20nm程度の黒い穴が局所的に形成されていることが明らかになった。使用済みカートリッジ薄膜のナノインデンテーション試験を行い、Cs_2TeはNa_2KSbより弾性率が小さい可能性がありCs_2TeはNa_2KSbより軟かい可能性があることがわかった。インデンテーション試験結果よりCs_2Teは表面がナノオーダーの範囲で製膜の不均一性から表面粗さが大きい可能性があり、Na_2KSbは使用後不均一の放電によって表面粗さが増大する可能性がある。

2.2.1.9. 学会での報告

(1) Y. Nakazono, K. Miyoshi, T. Ueda and M. Uesaka, IPAC10, 京都国際会議場

(2) 中園祥央、三好邦博、上田徹、上坂充、「Electromagnetic heat design of S-band Linac」、第6回日本加速器学会年会2010

(3) 中園祥央、三好邦博、上田徹、上坂充、「Electromagnetic heat design of S-band Linac」、高輝度高周波電子銃研究会2011

(4) 中園祥央、三好邦博、上田徹、上坂充、「フォトカソード高周波電子銃における可視光駆動と熱問題」、日本原子力学会2011春の年会、福井大学

2.2.2 高周波超伝導空洞用入力カプラーの開発

2.2.2.1 はじめに

本研究は、1.3GHzCW型超伝導空洞用入力カプラーの開発である。加速勾配20MV/m運転時に$Q_L=5\times10^6\sim2\times10^7$、最大入力パワー20kWが入力カプラーの基本仕様である。これまでにカプラー用のセラミック窓を製作して大電力試験を行ったが、10kWまでのパワー投入時に起きた急激なセラミック窓の発熱およびそれによる割れが問題となった。前年度はその原因の詳細を調べ、大電力試験におけるセラミック窓の急激な発熱と割れは予期せぬ共鳴ピークによるものであり、その周波数はセラミック窓に立つダイポールモードの周波数とほぼ一致することを高周波シミュレーションによって明らかにした。また、この共鳴ピークの周波数を1.3GHzから遠ざけるために、セラミック窓の厚みを6.2mmから5.4mmに変更し、31MHzだけ共鳴周波数をずらした改良セラミック

窓(cold窓)を製作した（図2-1）。この改良セラミック窓のローレベル測定を行ったところ、旧cold窓と改良cold窓の周波数は設計通りに約30MHzだけ周波数がずれていることが確認された(図2-2)。今年度は、改良cold窓にて旧cold窓と同じ大電力試験を行い、高周波設計の改良の効果を確認した。さらに、前年度は液体窒素温度への冷却試験を行って温度分布の測定が設計通りかを確認したが、今年度は液体窒素温度と室温温度変化を何回も繰り返す熱サイクル試験を行い、セラミック窓やろうづけ部などの割れや剥がれが起きないかなどの熱応力に対する耐久性を調べた。加えて、上の２つの実験結果から、高周波設計と熱設計の方針を決定し、カプラー試作機（カプラー１号機）を設計・製作した。その上で、一昨年度製作した断熱槽を用いたカプラー１号機の液体窒素温度冷却下での大電力試験を行い、セラミック窓の発熱や温度分布を設計と比較するとともに２次電子放出レベルなどを測定した。

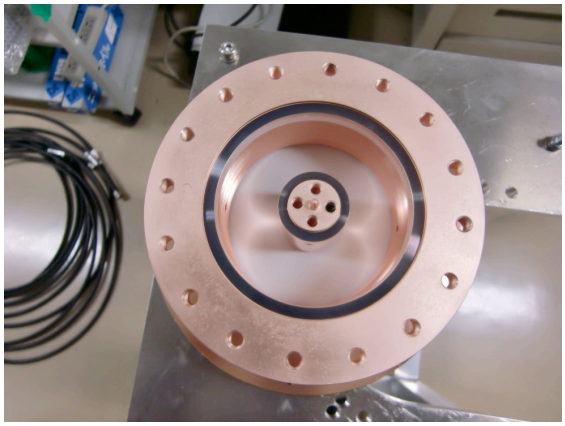


図 2-1:改良セラミック窓(写真)。

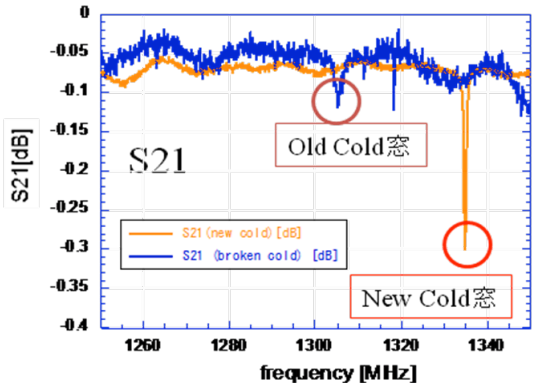


図 2-2：改良前後のセラミック窓（cold窓）のローレベル測定結果。

2.2.2.2 改良 cold 窓の大電力試験

改良した cold 窓(セラミック厚を 6.2mm から 5.4mm に変更したもの)の大電力試験を旧 cold 窓と同じ条件下で行った。図 2-3 がその setup である。電場の peak がセラミック窓に立つように端板を接続した。セラミック窓の端板側だけを真空引きして、この状態でセラミックにパワーを入れた。最初は 90 l/min の流量で内導体(真空側)を空冷し、端板の窓からセラミックを直接見るようにアークセンサを設置した。

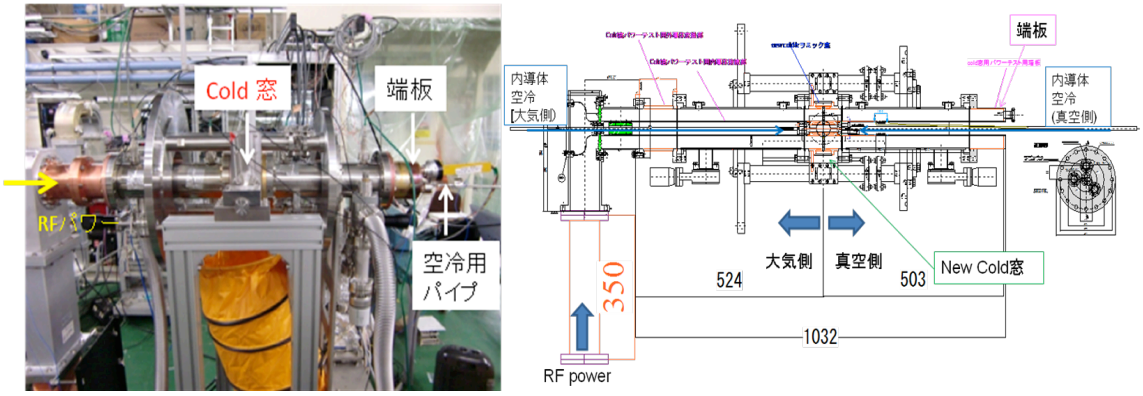


図 2-3: 改良セラミック窓を用いた大電力試験 setup（左：写真、右：詳細断面図）

図 2-4 がパワー投入の履歴である。20kW までスムーズにパワー投入ができた。真空は 3×10^{-6}Pa まで悪化し、特に空冷のふらつきに応じて、真空が変化しているのが分かった。真空の影響の詳細を調べるべく、さらに 25kW までのパワー投入を試みたところ、真空レベルが 1×10^{-5}Pa を超えるようになったが、しばらく一定のパワーを保持することで真空が良くなる傾向が見られた。この変化は、内導体のベローズの温度上昇によるものであることがわかり、空冷の流量を弱め、意図的に温度を上げ、ベーキングを行ったところ、空冷の流量をもとに戻してパワーを上げても真空の悪化が見られず、25kW までの投入が可能となった。なお、アークセンサによるインターロックは作動しなかった。従って、これらの真空の悪化はセラミック窓などからの２次電子によるものではない。図 2-5 は 20kW のパワーを保持した時のセラミック窓の温度上昇を測定した結果である。セラミック窓の温度は端板から直接放射温度計にてモニターした。前回は２時間程度で急峻な温度上昇が見られて８０℃以上の温度になったが、今回はそのような傾向が見られず、結果として約２時間でセラミック窓の温度上昇ΔＴは４０度程度であった。またさらに外部空冷を行うことで、セラミック窓の温度も下がり、ΔＴ=２５度の温度上昇で抑えることができた。

大電力試験後にセラミック窓を観察したが、割れや剥がれなどなかった。改良によって、25kW までの大電力試験でもセラミックの急激な温度上昇と割れを回避できることが分かった。この設計をカプラー１号機（試作機）に反映させた。

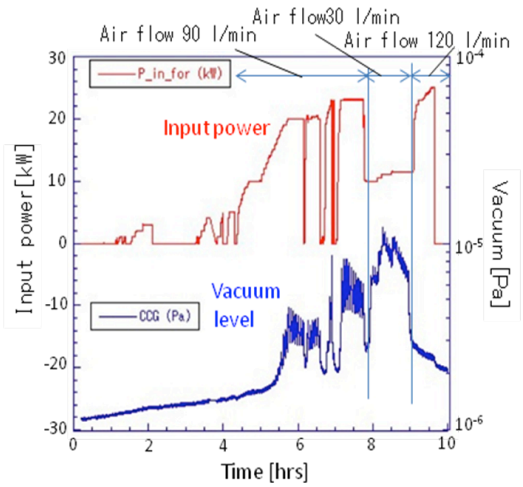


図 2-4:25kW までのパワー投入履歴の図。(赤：投入パワー、青：真空)

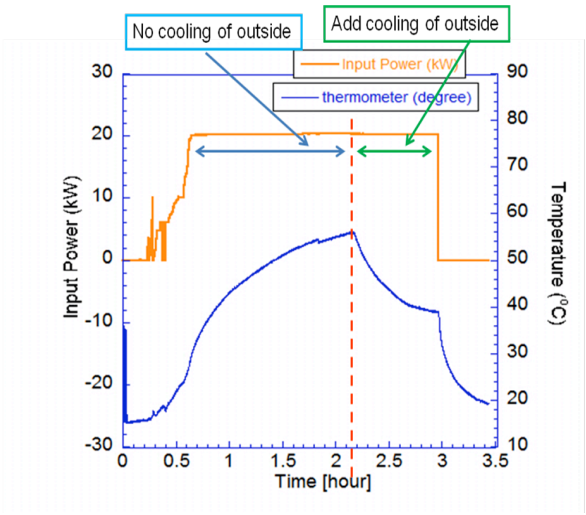


図 2-5：20kW 投入時のセラミック窓温度変化。(青：放射温度計でのセラミック温度、橙：投入パワー)

2.2.2.3 セラミック窓の熱サイクル試験

カプラーは 2K 温度の空洞への入熱を減らすべく cold 窓は液体窒素温度である 80K の温度定点に接続される。そこから cold 部の内導体等での発熱を吸収する必要がある。前年度は断熱槽内に cold 窓を設置し、その内導体部を意図的に発熱させ、液体窒素冷却時におけるセラミック窓を通じた入熱が設計通りであることを確認した。但し、この設計で参考にしたリニアコライダ用に製作したセラミック窓の cold 部が冷却後に割れるということが判明した。この原因が熱サイクルによるものではないかという疑いがあり、我々は今年度、室温から液体窒素温度までの冷却を繰り返した場合にセラミック窓が熱的な応力によって破壊されないかを確認するための熱サイクル試験を行った。

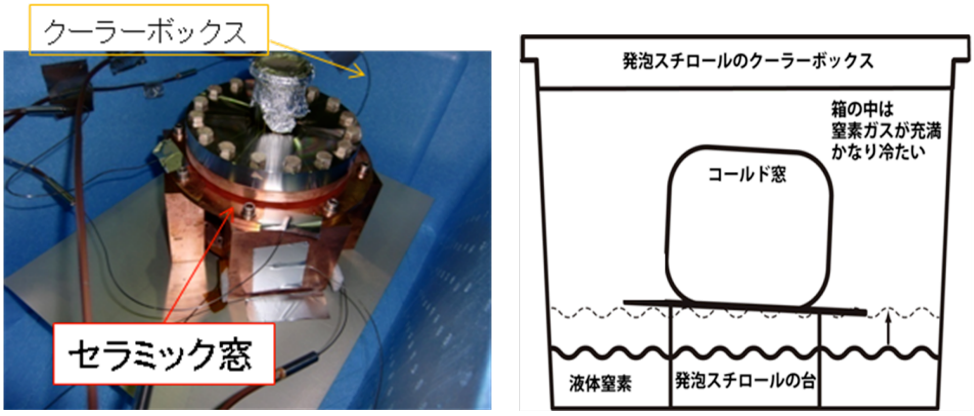


図 2-6: cold 窓の熱サイクル試験時の setup（左：写真、右：詳細断面図）

図 2-6 がその setup である。窓は割れていない予備の旧 cold 窓を用いて行った。cold

窓をクーラーボックス内に封入し、そこに液体窒素が気化してできた冷却ガスをゆっくり流していった。セラミックには熱電対を何か所か設置し、温度測定を行った。図 2-7 が冷却時の cold 窓の温度履歴である。実際の空洞モジュール冷却を模擬し、最低でも５－６時間以上かけて液体窒素温度(-196℃)になるようにゆっくり冷却していった。（２回目の冷却だけは-100℃までしか冷却しなかった。）液体窒素温度になった後は液体窒素を流すのをやめ、１日程度かけて自然に室温まで昇温した。

冷却回数	液体窒素冷却前リーク量	液体窒素冷却後リーク量
１回目	$< 1\times10^{-10}$ Pa m^3/s	$< 1\times10^{-10}$ Pa m^3/s
２回目	$< 1\times10^{-10}$ Pa m^3/s	$< 1\times10^{-10}$ Pa m^3/s
３回目	$< 1\times10^{-10}$ Pa m^3/s	$< 1\times10^{-10}$ Pa m^3/s
４回目	$< 1\times10^{-10}$ Pa m^3/s	$< 1\times10^{-10}$ Pa m^3/s
５回目	$< 1\times10^{-10}$ Pa m^3/s	**$>1\times10^{-4}$ Pa m^3/s** (リーク)

表2-1：熱サイクル前後でのセラミック窓のリーク量

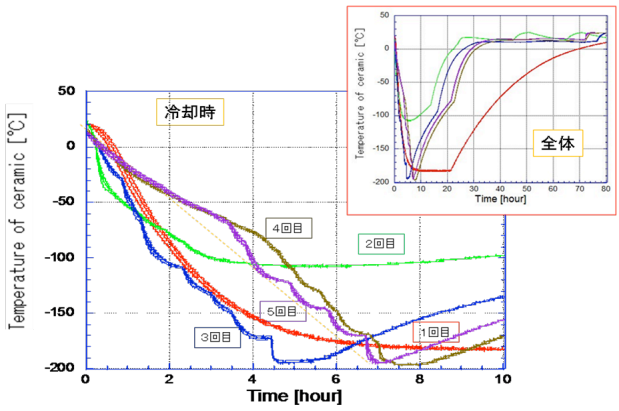


図 2-7:cold 窓の窒素温度冷却の温度履歴。（中央は冷却時の温度変化。右上図は昇温時も含めた全体の温度変化のグラフ）

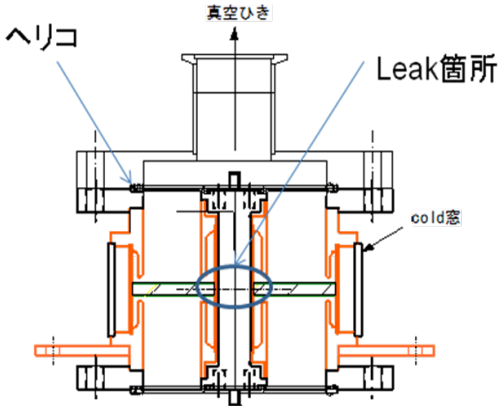


図 2-8：cold 窓の真空リーク check の setup とリーク箇所。緑がセラミック部、橙が銅を表す。

表 2-1 が５回の熱サイクル試験でのセラミック窓のリークテストの結果である。図 2-8 に示すように片面を真空ポートにつなぎ、リークディテクタに接続し、もう片面に He ガスを流し、リークチェックを行った。５回目の液体窒素冷却の後にヘリウムのリーク量が 1×10^{-4} Pa m^3/s となりリークが認められた。セラミック窓のリーク部を詳細に調べるためにカラーチェックを行ったところ、内導体の銅とセラミックを接続している部分が割れていることが判明した。さらに、割れ部分のセラミックを半割にし、リーク箇所の断面を見たところ、図 2-9 に示すように、セラミックの両端部からアーチ状にセラミック内部にひびが入っており、この部分でリークが生じたことが分かった。

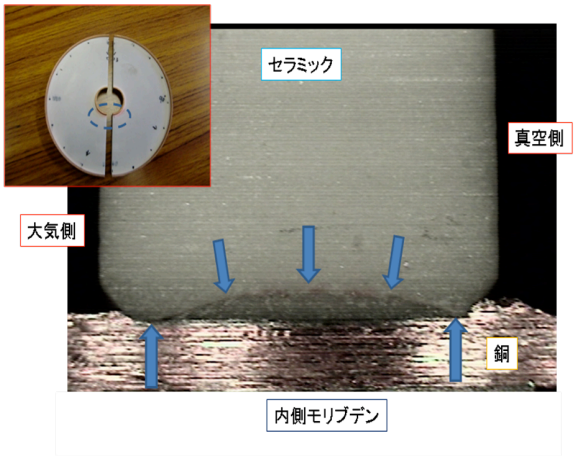


図 2-9:内導体部リーク箇所の拡大写真。(内導体のリーク箇所を半分に切り、その箇所を拡大した時の写真。青矢印が割れ部分。左上は半割にしたセラミックの写真。破線部が拡大前のリーク個所。)

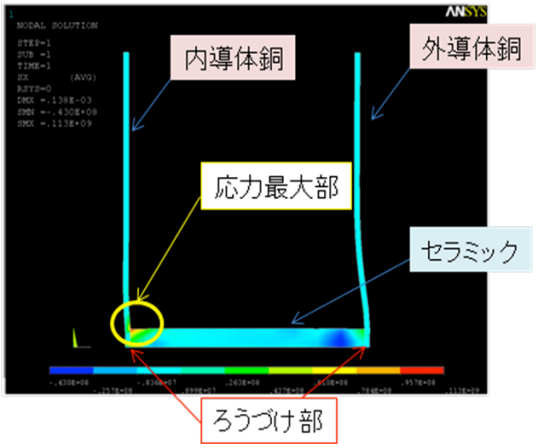


図 2-10：cold 窓の熱応力解析結果（セラミック窓の半分を模擬)。図は応力分布を示し、最大値はセラミックと銅の端に集中している。

このような割れ方はセラミックと金属などのろうづけ時に起こることが参考文献[1]に説明されている。特徴として、ロウ材が溶けて固まった後、異種材料の熱膨張率の違いから、セラミックと内導体の端に応力が集中し、セラミックの破壊応力を超えた時に図 2-9 に示すような応力分布に沿ったアーチ状の割れが生じる。従来このような割れを回避するために、内導体の内側にセラミックの熱膨張率に近い Mo のリングを入れてろうづけすることで熱膨張を相殺する。我々も同様な方法でカプラーのセラミック窓の製作を行っていたが、極低温では常温に比べてより大きな集中応力がセラミック端部にかかり、割れたものと思われる。割れの原因を詳しく理解すべく、ANSYS による熱応力解析を行った。解析では、内導体銅、外導体銅、セラミック及び内導体内側の Mo の物性値を使い、中心軸対称のみを拘束条件とした。また、実際のろうづけ温度 1000℃から-196℃までの温度変化ΔT=-1200℃を考えた。計算結果を図 2-10 に示す。図よりセラミックの端部に応力が集中しているのがわかる。比較のためにパラメータを変えて熱応力解析を行い、表 2-2 にまとめた。最大応力はどの場合でもセラミック端部に集中していた。Case1 が今回の旧 cold 窓での実験結果を模擬したものであるが、改良 cold 窓ではセラミック厚みが 5.4mm となり、Case2 がそれに対応する。熱応力解析の結論として、内導体の銅の厚みを薄くすること、及び Mo の厚みを厚くすることが効果的であることがわかった。また応力を相殺するために Mo の代わりにセラミックで支えるのも効果的であることが分かった。内導体の厚みをより薄くしたいが、組み立てのネジ締め時のせん断応力に耐えうることなど、現実の組み立てや実際のろうづけ条件をもとに Case4 をカプラー 1 号機の cold 窓のパラメータ値にとして反映することにした。

	セラミック厚み	内導体銅厚み	Mo厚み(case1との比較倍率)	セラミック最大応力	最大応力のCase１との比較
Case1	6.2mm	1.0mm	100%	4.85GPa	100%
Case2	5.4mm	1.0mm	100%	5.63GPa	116%
Case3	5.4mm	1.0mm	200%	4.57GPa	94%
Case4	5.4mm	0.8mm	200%	3.77GPa	78%

表2-2：セラミック窓の条件を変えた場合のΔT=-1200℃変化時の応力値（計算値）。

2.2.2.4 カプラー１号機の液体窒素温度下での大電力試験

前節までに実験したRF設計と熱設計の結果を反映し、カプラー試作機（カプラー１号機）の製作を行った（図2-11)。入力カプラーは1.3GHzで最大20kWの定在波運転であるが、超伝導空洞への粉塵混入による空洞劣化を防ぐためにセラミック窓を2枚設けた形となっている。特に空洞に近いcold窓は2Kへの入熱を防ぐために液体窒素温度(80K)に置かれることになる。特に今年度はクライオモジュールとの取り合いを具体化するために、この１号機を用いてクライオモジュールへの組み込みを含めた設計（入熱設計、機械的設計、及びＲＦ設計）を進めた。warm窓は大気側、cold窓はクライオモジュール内に設置されるように設計された。RFカップリングを保持するために空洞に対してcold窓を保持する構造とした。そのため、warm窓部とcold窓部は空洞冷却時の熱収縮を考慮して内導体と外導体ともにはベローズを介して接続される構造とし、そのベローズは±2mm以上のずれに対応できる設計とした。但し、このベローズにRFパワーを入れることによるマルチパクティングの増加やRFパワー投入時によるベローズ部の極度の温度上昇などが懸念されるため、RFの透過が良くてなおかつ定在波のピークにないようにベローズの位置を計算によって最適化した。また、そのベローズの内面の銅メッキ厚を調節して、ベローズ単体の温度上昇及びcold窓への入熱を極力抑える設計とした。なお、これらのカプラーの設計はクライオモジュールへの組み込みを想定したものであり、クライオモジュールの設計に反映された。また、入力カプラー組み込み用の治具の設計にも反映される。

今年度前半まで窓単体の大電力試験を主に原研にて行っていたが、入力カプラーをCW型超伝導空洞モジュールに組み込む場所であるKEKの東カウンターホールにカプラーテストスタンドを移設し、初めてカプラー1号機の大電力試験を行った。

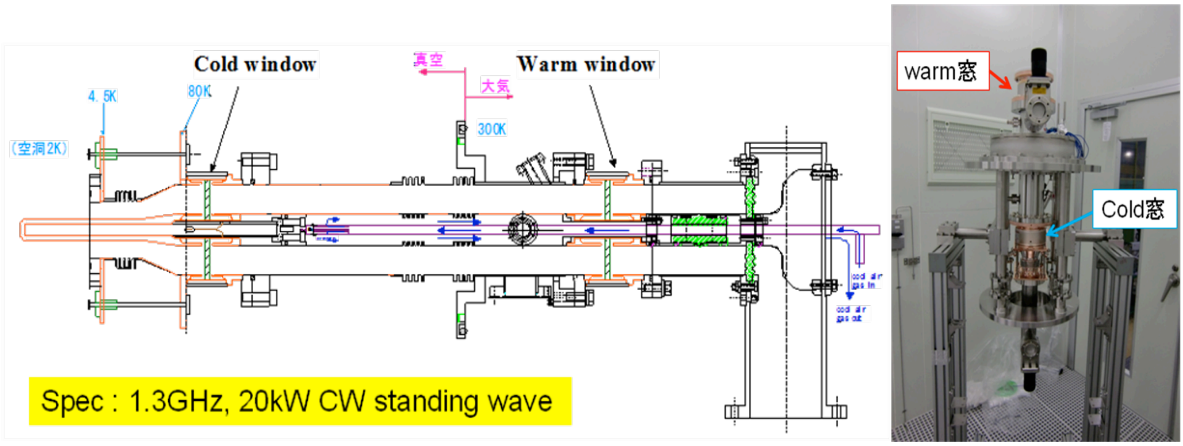


図 2-11: カプラー 1 号機の詳細図(左)。組み立て時の写真（右）

図 2-12 が大電力試験スタンドの setup である。東カウンターホールのクリーンルーム内にてカプラー1 号機を組み立てた（図 2-11 右)。その後、断熱槽で cold 窓を覆い、液体窒素タンクに汲んだ液体窒素からブレード線にて cold 窓を 80K 近くに冷やし、モジュール組み込みに近い条件下にて、カプラー1 号機の大電力試験を行った。図 2-12 の右図にその詳細を示す。内導体は結露を防ぐため、窒素ガスで独立に冷却し、その流量は 110 l/min に設定した。真空は 150℃、24 時間のベーキングの後、cold 窓側(図 2-12 水色部)、warm 窓側(図 2-12 緑部)を独立にイオンポンプで排気し、それぞれ CCG でモニターした。パワー投入時発生する 2 次電子はプローブ(e-probe1,2,3)でモニターし、付随する発光は cold 窓、warm 窓に面するアークセンサー(arc1,2)でインターロックをかけた。RF パワーは 1.3GHz の 30kW IOT からドアノブ変換器を通じて投入され、カプラー先端は端板を付けて実際の運転と同じくカプラー内に定在波が立つ条件で大電力試験を行った。実際は、運転時と定在波の条件が 90° 位相が異なるが、セラミック窓には電場や磁場のピークが立たない設計となっており、実際の運転時と放電レベルなどに大きな違いはないと思われる。また、ベローズの配置は運転時に磁場のピークが最小となるが、この試験では温度上昇がベローズ中心で最大となる配置であった。したがって、この条件下で温度上昇が大きくなければ、実際の運転で十分に使用可能であると判断できる。内導体部と外導体部の各ベローズと cold 窓などに熱電対を配置し、温度上昇をモニターした（図 2-12 TC1-4)。なお、断熱槽内では室温からの輻射を防ぐために、cold 窓と外導体に熱シールドを覆っている。図 2-13 に 1 号機へのパワー投入履歴を示す。最初は 20kW 近くまで放電や真空度悪化によるインターロックは作動せず、RF パワーがスムーズに投入できたが、その後はアークセンサのインターロックによりパワーが落ち、頻繁にアークセンサが反応するようになって、それに伴う電子放出が warm 窓近傍のプローブ(e-probe3)から検出された（図 2-13 右)。warm 窓でマルチパクティングが起こっているものと考えられ、これにより warm 窓側で 10kW 以上にパワーが上がらなかった。そこで 8 時間のパルスプロセスを行い、真空レベルが 1×10^{-4}Pa

を超えない状態を保ちながら、頻繁に２次電子で表面を叩くことで効果的に warm 窓のプロセスを行った。これにより、最終的に 20kW まで到達し、この後は最大 25kW の定在波をカプラーに投入することができた。

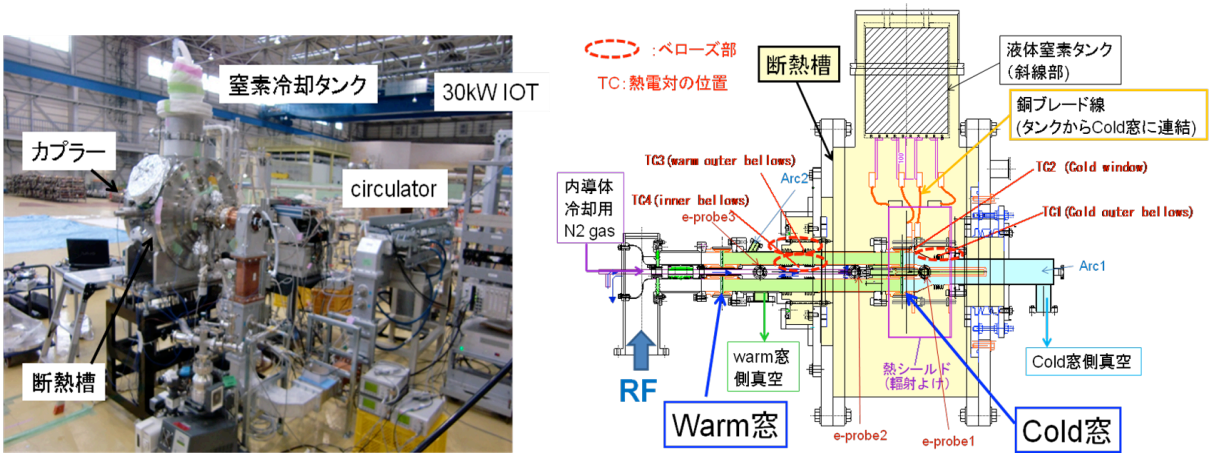


図 2-12: カプラー１号機の大電力試験 setup。左：setup 写真。右：断熱槽内部とカプラーの詳細図。

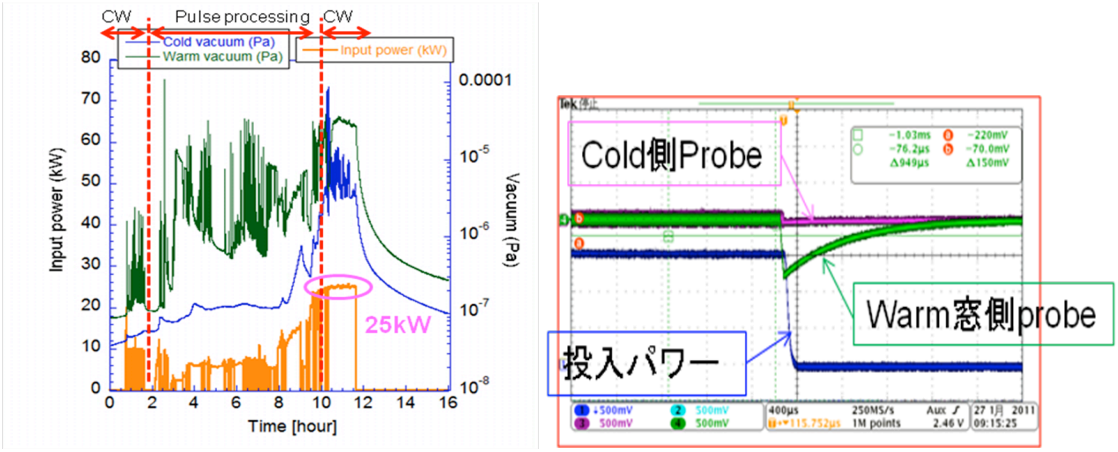


図 2-13: 25kW までの大電力試験結果。左図：（橙：投入パワー、青：cold 窓側真空、緑：warm 窓側真空）。途中パルスプロセスを行う。右図：アークセンサ反応時の電子放出の反応。

その後、図 2-14 に示すように 20kW の定在波を約 16 時間保持し、温度の詳細データを測定した。まずはベローズの温度であるが、内導体ベローズは窒素ガスでの空冷により、120 度以下の温度上昇に抑えられ、真空は warm 側では最高で 4×10^{-6}Pa まで上がった後、下がっていく傾向が見られた。cold 部の外導体のベローズの温度上昇は ΔT=113 度であったが、温度としては-30℃以下であった。この部分はモジュール組み込み時には 80K と 5K のアンカーの間に設置されて冷却が強化されるので、cold 外導体ベローズ部の発熱による温度上昇は特に問題ないと考えられる。但し、運転時の 5K へ

の入熱がどれくらいになるかは、モジュール組み込み時における今後の大きなテーマの一つである。warm 窓近くの外導体のベローズは、カップリングを変えたり冷却時の熱収縮による歪みを回避したりするために、モジュール内に設置する必要がある。本カプラーにとって、このベローズの温度上昇の抑制も、今回の測定の大きなテーマであったが、温度上昇が 50℃程度で抑えられており、断熱槽内で問題なく発熱を抑えられていることが分かった。特に、設計時の計算に基づいてベローズ内面に 150μm の銅メッキを施したことが、今回のこの温度上昇の抑制に効果的であったので、カプラー実機の設計に反映させる予定である。次に cold 窓の温度上昇であるが、cold 窓は窒素冷却時では-165℃であったが、パワー投入で ΔT=83 度の温度上昇が見られた。窒素温度の冷却により温度では-82℃で安定であった。昨年度のセラミックの冷却試験と同様に、セラミック窓を通じて内導体の入熱を cold 窓の 80K アンカーが吸収していることが分かった。実際のモジュール設計では、ブレード線の本数を増やして温度上昇をさらに軽減させる予定である。

この大電力試験では、プロセス後は 20kW までスムーズにパワーが投入でき、またパワーダウンが無い状態で 8 時間以上、合計 16 時間弱 20kW の運転を継続できた。さらに一旦昇温してカプラー内部を大気に意図的に 4 時間程度開放し、再度同じ setup で液体窒素温度に冷却して大電力試験を行った後、24kW まで放電無しでパワーを投入することができた。一度プロセスを行えばそのプロセスの効果が保持されることが確認された。これはモジュールに組み込んだ状態で一旦カプラーを大気解放しても、スムーズにパワーを再投入できることを示唆している。

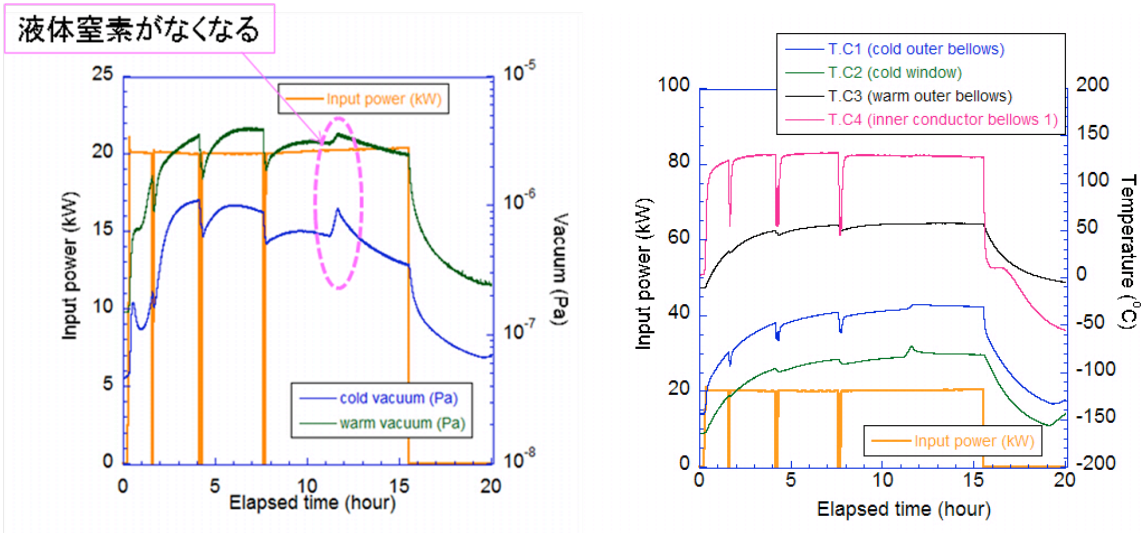


図 2-14:20kW を定常運転時。左図：投入パワー履歴(橙) と cold 部、warm 部の真空のグラフ(青、緑)。右図：パワー履歴(橙)と cold 窓温度(緑)、cold 部外導体ベローズ温度(青)、warm 部外導体ベローズ中央温度(黒)、内導体ベローズ中央部温度(ピンク)のグラフ。温度

は約 15 時間でおよそ一定で、3 回のパワーダウンは放電ではなくてノイズによるものである。

これらの実験から 1 号機の設計は CW 用超伝導空洞のカプラーとしては RF 及び熱設計として問題ないことが確認された。大電力試験に引き続き、今後、同じ setup にて、カプラー 1 号機の cold 窓の熱サイクル試験を行う予定である。

2.2.2.5 まとめ

改良 cold 窓にて電場ピークをセラミック窓に立てた場合の大電力試験を行った。改良後は 25kW までスムーズにパワー投入が可能であり、急激な温度上昇も見られず、セラミック窓の RF 設計の方針が決まった。それに対し、ろうづけ条件の再確認のため、液体窒素温度と室温間の温度変化を何回も繰り返す熱サイクル試験を旧 cold 窓を用いて行った。5 回の熱サイクル試験後、セラミック窓の内導体部に割れが起こっていることが判明した。セラミック割れの断面から、熱応力によるものである可能性が高く、熱応力解析を行い、応力集中を 20%以上低減する設計をカプラー 1 号機の cold 窓に反映した。今年度はさらに、カプラー試作機（カプラー 1 号機）を設計・製作した。また、前々年度製作した断熱槽で cold 窓を覆い、液体窒素タンクに汲んだ液体窒素からブレード線にて cold 窓を 80K 近くに冷やすことで、クライオモジュール組み込みに近い条件下にて、カプラー1 号機の大電力試験を行った。10kW にてマルチパクティングが発生したが、パルスプロセスを行い、定在波で最大 25kW のパワーを入れることができた。また、プロセス後、20kW で 16 時間パワーを保持することもできた。内導体ベローズは窒素ガスでの空冷により、120 度の温度上昇に抑えられ、真空は warm 側は最高で 4×10^{-6}Pa まで上がった後、下がっていく傾向が見られ、安定な運転が可能であることが分かった。また、発熱が大きい内導体の入熱が cold 窓の 80K アンカーによって吸収されていて熱設計が十分機能していることがわかった。モジュール設計時にはブレード線の本数を増やし、温度上昇をさらに軽減させる予定である。他のベローズの温度上昇も問題ないレベルであり、カプラー1 号機の熱設計は大電力試験でも問題ないことを実験的に示すことができた。プロセスの効果は昇温して大気解放した後でも保持されていることを最後に確認した。

今年度までにこれまで問題となった RF 設計や熱設計の課題がほぼ解決された。今後の緊急の課題は、ろうづけ条件の改良を行ったカプラー 1 号機の cold 窓の熱サイクル試験において熱的な応力によるセラミックの破壊が回避できるかどうかを確認することである。当面は１０回の熱サイクルに耐えることを目標とし、仕様を満たせば、主空洞モジュール組み込み用のカプラー実機 2 台の製作を進めていくことになる。熱サイクル回数を満たさない場合は、さらにストレスを抑えた設計・製作を行い、再度熱サイクル試験を行うことになる。

参考文献

[1] K. Suganuma, et. al., Ann. Rev. Mater. Sci. 1988.18:47-73

2.3　成果の外部への発表

様式第２１に記載。

2.4　活動（運営委員会等の活動）

特になし

2.5　実施体制

別表１　平成２２年度に於ける実施体制

研　究　項　目	担当機関等	研究担当者
(1)新フォトカソード開発及び高周波超伝導空洞用入力カプラーの開発	東京大学大学院工学系研究科原子力専攻	◎上坂　充
①新フォトカソード開発	東京大学大学院工学系研究科原子力専攻	◎○上坂　充 中園　祥央
②高周波超伝導空洞用入力カプラーの開発	東京大学 物性研究所	○中村典雄 高木宏之 篠江憲治 渋谷孝 工藤博文 伊藤功

様式第２１

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目: 「超伝導加速による次世代小型高輝度光子ビーム源の開発」(新フォトカソード開発及び高周波超伝導空洞用入力カプラーの開発)

機 関 名: 国立大学法人東京大学

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
Power coupler development for ERL main linac in Japan（ポスター ）	H. Sakai,T. Furuya, S. Sakanaka, T. Takahashi, K. Umemori,A. Ishii, N. Nakamura, K. Shinoe, M. Sawamura	International Particle Accelerator Conference 2010(IPAC10)	2010 年 5 月	国内
Development of a prototype module for the ERL superconducting main linac at KEK（ポスター）	T. Furuya,K. Hara, K. Hosoyama, Y. Kojima, H. Nakai, K. Nakanishi, H. Sakai, K. Umemori, M. Sawamura, K. Shinoe	International Particle Accelerator Conference 2010(IPAC10)	2010 年 5 月	国内
Observation of resonance mode in coaxial-type input coupler（ポスター）	K. Unemori, T. Furuya, H. Sakai, M. Sawamura, K. Shinoe	International Particle Accelerator Conference 2010(IPAC10)	2010 年 5 月	国内
ERL 主ライナックのためのカプラー開発 -- 改良セラミック窓のハイパワー試験 --（ポスター）	篠江憲治、阪井寛志、梅森健成、沢村勝、中村典雄、古屋貴章	第７回加速器学会	2010 年 8 月	国内

ERL 超伝導主加速器空洞の入力カプラーによる横方向キックの計算（ポスター）	武藤俊哉、古屋貴章、梅森健成、阪井寛志、沢村勝、篠江憲治	第７回加速器学会	2010 年 8 月	国内
UPGRADE OF CARTRIDGE-TYPE EXCHANGEABLE NA2KSB CATHODE RF GUN	Y. Nakazono, K. Miyoshi, T. Ueda and M. Uesaka	International Particle Accelerator Conference 2010(IPAC10)	2010 年 5 月	国内
Electromagnetic heat design of S-band Linac	中園祥央、三好邦博、上田徹、上坂充	第 6 回日本加速器学会年会 2010	2010 年 8 月	国内
Electromagnetic heat design of S-band Linac	中園祥央、三好邦博、上田徹、上坂充	高輝度高周波電子銃研究会 2011	2010 年 8 月	国内
フォトカソード高周波電子銃における可視光駆動と熱問題	中園祥央、三好邦博、上田徹、上坂充	日本原子力学会 2011 春の年会	2011 年 3 月	国内
Development of a main linac module for compact ERL（口頭）	K. Unemori, T. Furuya, H. Sakai, T. Takahashi, M. Sawamura, K. Shinoe	International LInear Accelerator Conference 2010(LINAC10)	2010 年 9 月	国内

２．学会誌･雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所(学会誌･雑誌等名)	発表した時期	国内・外の別
（なし）				