別紙2

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「溶接技術の高度化に資する高精度非破壊検査装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成22年 3月

- 委託者 近畿経済産業局
- 委託先 学校法人立命館

目 次

第1章 研究開発の概要	3
1 - 1 研究開発の背景・研究目的及び目標 「研究背景」 「研究目的及び目標」	3 3 3
1 - 2 研究体制	7
1-3 成果概要 X線ターゲットのサイズを数ミクロンにする研究開発 軌道半径8cm以下、1MeVの卓上型放射光装置の開発 入射器のカソードのメンテに必要とされる所要時間を1時間以内にする X線ターゲットの設置精度を数ミクロン以下とし、かつ取り替え時間を10 分以下とすること。 サブミクロンの解像度を得るために、Johansson型光学素子を導入して、 X線収束点の大きさを10ミクロン以下にする	8 10 12 13 14
1-4 当該研究開発の連絡窓口	15
第2章 本論	16
2 - 1 数ミクロンの解像度を有する非破壊検査装置の開発	16
2 - 2 1MeV 電子エネルギーの卓上型放射光装置の開発	22
2 - 3 入射器のカソードのメンテに必要とされる所要時間を1時間以内に短縮	27
2 - 4 X線ターゲットの設置精度(1ミクロン)とスイッチング時間(10分)の短縮	29
2 - 5 サブミクロンの解像度を有する非破壊検査装置の開発	30

第3章 全体総括

32

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

「研究背景」

発電、工業用等プラントに関する事項として、製品の使用条件の高温化、極低温化、高圧 化等高性能化ニーズへの対応や、長期供用性の確保及び向上を行い、製造コスト削減及び短 納期化するために、安全性及び信頼性の確保を行う必要があり、そのための非破壊検査が必 要とされている。

あるいは、航空・宇宙に関する事項として、アルミニウム、チタン等の特殊合金溶接部の 信頼性の向上や、薄板化に伴う薄板構造部材の溶接部の信頼性の向上や、新材料(複合材採 用等)の接合技術開発において信頼性の向上をはかる上で、非破壊検査の向上が必要である。 航空機の信頼性を確保することは乗客の安全のために極めて重大であり、溶接部のミクロン オーダーのクラックが重大な破壊に繋がると言われている。しかるに、ミクロンオーダーの クラックや欠陥を観測する手段が無い。

構造物の検査には従来、10MeV 程度のライナックが使用されているが、このライナックを 製造する企業が日本から喪失している現状はあまり知られていない。10年以上前に三菱電 機(㈱が製造したライナックが全国の鉄鋼構造物の検査に使用されているが、三菱電機㈱が 製造を中止して技術を Varian 社に売却した結果日本からライナックの製造技術が喪失した という現状がある。

さらに、ライナックで得られる非破壊検査の解像度が3mm程度であることが問題である。 従来のライナックでは、溶接技術の高度化に対応できない事態が発生している。ライナック を高精度な非破壊検査装置にリプレースしなければ、日本の国際競争力を確保する次の高度 化目標を達成することができない。

「研究目的及び目標」

電気部品の実装ではパッケージ 内の IC チップの各種接合面の観 察や、鉛フリーはんだでの接合部(リフ トオフ、デンドライド、ウィスカ、ボイド、異 物)を見るには、マイクロフォーカス X 線管を用いた X 線透過イメージ ングや CT スキャンが使用されている が、透過力が不足しているために 時間がかかる上に、見られない ケースが多い。チップ裏面の剥離 状況を見るには、パッケージをエッ チング後に超音波で観察している が、解像度が不十分である。BGA を未接触の観察で行うには、マイク ロフォーカス X 線管を使用している が、斜めからしか見ることができな



図1 - 1 卓上型放射光装置の内部。電子蓄積リングの 電子軌道に微小金属を挿入してX線を発生する。

い。パンプ形状や内部の組成ムラを見たいという要求があるが、見る方法が無い。これら電子 部品の実装技術では、サブミクロン解像度を有する非破壊検査技術が求められている。

この様な現状を見越して、(㈱光子発生技術研究所(以下光子研)では10年にわたり、超 高精度非破壊検査装置の開発に取り組んでいる(図1-1)。装置は、卓上型放射光であり、 電子蓄積リングをベースにしているが、電子軌道内に微小ターゲットを設置し、電子を衝突 させることにより、数10ミクロンという微小焦点を実現している。開発した装置は、20MeV、 6MeV、4MeV の各電子エネルギーを有する卓上型放射光装置であり、図1-2は、電子蓄 積リングの一辺が35cmのモデルである。

図1 - 3は、ターゲットの大きさにより、解像度がどれほど変わるかを示したものである。 ターゲットの形状には、ロッド型、ボール型、ワイヤー型があり、ワイヤーターゲットの場合に は、一方向に対して 20LPM(左端)を達成している。MeV 領域の高エネルギーX 線を発生 しているので、数 10 ミクロンのロッド型ターゲットを用いて、プラント配管の腐食やエンジン 内部を観察することに成功している。



図1 - 2 シンクロトロンの一辺が35cmである MIRRORCLE-CV4。全体の長さは横 185cm である。移動使用が可能。本プロジェクトでは、さらに小型の 1MeV 装置を開発している。



図1 - 3(a) (左)ターゲットの大きさにより、X線チャートを用いて解像度の評価をしたもの。 11倍の拡大撮像で、LPM:20を出すことができる。(右)プラスチックのエッジを観察したもの。 の、ターゲットを小さくする事でエッジ強調も顕著となる。



図1 - 3(b) ターゲットの形状を示す。ロッド型やボール型の金属片を、C等のワイヤーで つり下げた形である。



図1 - 4 外径15cmの配管を、10cm 断熱材が有る状態で観察した例。断面に応答が観 測されるのみならず、正面から見ても、腐食の凹凸が顕著に見える。

図1 - 4は卓上型放射光装置を用いて、肉厚10mm、外径 15cm 配管の断面を断熱材の 外から観測し、腐食の状態を見た例である。ここまでの精度で見られた例は無い。

なお、電子蓄積リングの電子軌道に微小ターゲットを挿入して、電子を衝突させて制動 放射 X 線を発生する。電子ビームがターゲットに衝突して、発熱することはない。ターゲット が微小であることと、電子エネルギーが高いために、電子はほとんどが透過してターゲット 内に止まることはなく、発生する X 線や 2 次電子もほとんどがターゲットを透過するため、 熱として蓄積することが無い。イオン化による発熱はわずかである。ターゲットのサイズが 1mm 以上の時には、加熱して表面が融けることも観測されている。

この様に、卓上型放射光装置は、従来のライナックを使用した X 線非破壊検査装置に 比べて優れた成果を出している。ところが、溶接技術や電子部品実装において要求されて いる、数ミクロンの解像度にはほど遠い。また、装置は、現場で使用するために、電子エネ ルギーを 1MeV 以下にする必要がある。装置の小型化や軽量化も、使い勝手を良くし、か つ価格を下げるために重要な課題である。そこで、基盤技術高度化のための特定研究開 発として、溶接技術の高度化に資する高精度非破壊検査装置の開発を行う。計画は、プラ ントや航空機の溶接部を検査するための、解像度数ミクロンの非破壊技術と、電子部品の 実装技術向上を目指すサブミクロン解像度の非破壊検査技術である。

1-2 研究体制

本研究開発の研究体制を図1-2-1に示す。立命館大学の山田廣成教授をチームリー ダーとして、光子研が開発を担当し、利用と評価を協力機関である日立製作所の佐藤克利氏、 ユニハイトシステムの平嶋龍介氏、発電技研の水野亮二氏が担当する。



図1-2-1 本研究開発の研究体制。

1-3 成果概要

(㈱光子発生技術研究所が申請している法認定計画では、数ミクロンの解像度を有する 非破壊検査装置と、サブミクロンの解像度を有するX線顕微鏡の開発を目標としているが、 立命館大学を管理法人とする本委託開発で、21年3月末までに実施する研究開発につい て申請した内容と照らし合わせて研究成果の概要を述べる。

X線ターゲットのサイズを数ミクロンにする研究開発

コの字型金属製フレームの先端にワイヤーを張り、そのセンターにロッド型やボール型の ターゲットを接着して製作する。フレームの幅が10mmであり、ワイヤーには、通常10ミクロ ン程度のカーボンワイヤーを使用している。ターゲット材料としては、数十ミクロン以上の球 状やロッド状金属(W、Cu等)を使用している。接着剤には、EPO-TEK EE375 を使用して いる。このターゲットのサイズを今回の開発で数ミクロンにまで縮小し、支持材にはカーボン ナノチューブ CNT を用いることとし、独立行政法人産業技術総合研究所の青柳グループ と共同研究を進めることとした。

1 - 1) 支持材は、電子が当たった時になるべく X 線を発生しない材料を使用する。たと えば Be や C である。ポリイミドは薄膜状で、100nm の厚さまで製作し、これにターゲットを 乗せて接着する。

[成果1]

CuやWについて、5~10 ミクロンの粒子を選別して支持材に乗せてターゲットを作ること ができた(図1-3-1)



図1-3-1 8µm タングステン球ターゲット。

[成果2]

産総研青柳グループの協力により、100nm 厚さポリイミド薄膜を製作し、電子ビームを照 射したところ、ポリイミドは十分な強度を示し、支持材として使用できることがわかった。

1 - 2) カーボンナノチューブ(CNT)の使用を検討しているが、単一の CNT のサイズは、 ナノであり、強度が不足するところから、この CNT をより合わせた繊維を使用する。現在、1 0ミクロンまでの繊維を製作することに成功しているので、数ミクロンを達成目標としている。

[成果3]

オーストラリア CSIR の CNT グループと契約を結び、糸状及び薄膜状の CNT を入手す ることができた。糸状 CNT に最小 8 ミクロンターゲットを接着し、良好な結果を得ることがで きた。 CNT は、強度が強く、耐久性が有る。

1 - 3) X 線ターゲットの微細化に伴い、ターゲット材料の加工技術及び、ハンドリング技術の高度化が要求された。また、ターゲットフレームへのターゲットの設置精度の向上が要求された。そのため、専用のマニピュレーターをデザイン、製作した。

[成果4]

コの字型金属製フレームの先端にワイヤーを張り、そのセンターにロッド型やボール型の ターゲットを接着して製作する。フレームの幅が10mmであり、ワイヤーには、通常10ミクロ ン程度のカーボンワイヤーを使用している。ターゲット材料としては、数十ミクロン以上の球 状やロッド状金属(W、Cu等)を使用している。接着剤には、EPO-TEK EE375 を使用して いる。このターゲットのサイズを今回の開発で数ミクロンにまで縮小し、支持材にはカーボン ナノチューブ CNT を用いることとし、独立行政法人産業技術総合研究所の青柳グループ と共同研究を進めることとした。

[成果5]

上記の目的にあった治具をつくり、ターゲット製作が確実になり、時間が短縮された(図1 - 3 - 2)。



図1-3-2 ターゲット製作のためのマニピュレーター。

軌道半径8cm以下、1MeVの卓上型放射光装置を開発(現在は4MeV)

卓上型放射光装置の電子エネルギーを 1MeV にするための、1.電子銃の設計及び製作、と2.電子蓄積リングの軌道半径を 8cm 以下にするための軌道計算、をおこなう。シン クロトロン本体を製作するのは、次年度となる。

2 - 1) 1MeV 入射器

マイクロトロン型の 1MeV 電子銃を新たに設計・製作し、試験を行った。マイクロトロン型 加速器は電子を磁場中で周回し加速するため高品質で大電流の電子ビームを発生するの に適している。

2 - 1 - 1) 永久磁石を用いた磁石の開発

磁場の発生には、永久磁石を試作し、必要な磁場が発生できるかを試験する。

[成果6]

当初、磁場の発生には永久磁石を用いることを前提に進めたが、1MeV 電子ビームの発 生に最適な磁場強度を作るには電磁石を使う方が有利であると判断されたので、電磁石を 製作した(図1 - 3 - 3)。電子銃からのガス出しを大容量排気速度のターボ分子ポンプで真空 引きできる構造にした。製作した磁石の磁場強度を測定し、製作した磁石にて 1MeV 電子の発生 に必要な磁場を発生し、最適化できることを確認した。

永久磁石を使う方がランニングコストを下げられるので、量産機では永久磁石を使用することを検討する。主な磁場の発生に永久磁石を用い、磁場の微調整は小型の電磁石コイルで補正する構造を検討する。



図1-3-3 製作した 1MeV 電子用磁石。

2-1-2) 大電流の電子ビームの発生

大電流電子ビームを発生するために、加速空洞の改良をおこなう。低エネルギーで大電 流電子ビームを発生するために、冷却効率が高く、高いQ値(空洞の質を評価する物理パラ メータ。Q値=「投入電力」:-「損失電力」)を持つ加速空洞の開発が要求される。

[成果7]

製作した新型マイクロトロン加速空洞のQ値を測定したところ 6900 であった。従来の空洞のQ 値が 3000 であるので、二倍近くQ値が向上したが、必ずしも高いQ値が得られなかったので、 今後さらに改良を要する。

2 - 2) 1MeVリング

2-2-1) 軌道半径 8cm 以下の電子蓄積リングの開発

軌道半径8cm以下の電子蓄積リングを設計、試作する。また、従来の電子蓄積リングでは 電磁石のみを使用していたが、冷却水が必要で小型化の妨げであった。そこで、本開発では電 子蓄積リングの励磁に永久磁石のみを使用し、磁石本体の軽量化及び装置システムの簡素化を 図る。

本年度は物理設計が主な内容で、来年度は電子蓄積リングの磁石の機械設計・製作・磁場の評価をおこなう予定である。

[成果8]

本年度の研究開発により 8cm の軌道半径に 1MeV 電子が入射可能であることがわかった。従 来機に比べ軌道半径は半分にスケールダウンするが、電子の周回可能領域は同じサイズ に設定することで電子の周回効率を倍に引き上げることが可能である。

磁場解析プログラムを用いた磁場最適化作業も並行に進めた。過去の実績から、磁場解析で 求めた結果と実測結果は良い一致を示している。本開発では永久磁石を用いるので、磁極の微 調整で磁場強度の調整ができる構造を検討する必要がある。

来年度は、電子蓄積リングの磁石の機械設計・製作・磁場の評価をおこなう予定である。

2 - 3) 1MeV 用パータベータの開発

2-3-1) 入射のシミュレーションを前記に示した方針で行い、100%の入射効率を確認 する。

[成果9]

電子蓄積リングの磁場計算と同様に、磁場解析プログラムを用いて 1MeV 電子の入射に必要 なパータベータ磁場を計算した。その磁場を用い 1MeV 電子の入射シミュレーションをおこない、 入射可能領域が従来機の3倍になることがわかった。1MeV 電子ビームのエミッタンス(ビームの 質を表す物理パラメータ)を重ねたところ、入射可能領域内に納まることを確認した。これは10 0%の効率で蓄積リングへ入射可能であることを示している。

2-3-2) 小型パータベータを製作する。8cm という軌道に沿った小型パータベータの試作を行い、磁場測定を行う。

[成果10]

1MeV 電子蓄積リングへの100%の入射効率を達成することがわかったので、小型パータ ベータの製作をおこなった。電子蓄積リングの小型化に合わせ、パータベータ本体を小型化した。 従来形状のスケールダウンでは機械的に強度が不足するので、構造の見直し、単純化に成功、 小型化と構成部品の省略による簡素化を達成できた。製作したパータベータのピーク強度が、計 算結果とほぼ同じ値を示し、実用に際して問題の無いことを確認した。

入射器のカソードのメンテに必要とされる所要時間を 1 時間以内にする(現在は 5 時間)。

従来、入射器の電子線源であるカソードはフィラメントと電子銃を別々に組み付け、カソードの 交換は入射器を開閉しおこなっていた。そのため、真空引きを含めた交換作業に 5 時間以上を 要していた。このカソード構造をカセット式にし、カソードの交換作業に要する時間を短縮するカ セット式のカソードを設計・製作した。また、大容量のターボポンプとイオンポンプを設け、真空引 きに要する時間を2時間に短縮した。

3-1) カセット式カソードの試作。

入射器のカソードをカセット化し、カソードの交換作業に要する時間を短縮する。カソードの位置

出しを精度良くできるようにする。

[成果11]

入射器の電子線源であるカソードの構造をカセット化し、カソードの交換作業に要する時間を 30 分に短縮するカセット式のカソードを設計・製作した(図1 - 3 - 4)。カセットは位置調整用のジ グ上で組立てと位置調整ができる構造にした。ジグと加速空洞本体は位置決めピンにて位置を合 わせ、そのまま取り付け可能。カソード中心位置と深さが 0.025mm の精度で再現していることが 分かった。



図1 - 3 - 4 製作したカセット式カソード。組み立てた後に位置調整が容易にでき、部品ごと加速 空洞へ取り付けられる構造にした。

3-2) 大容量真空システムの導入

電子銃の取り付け作業は、入射器の磁石ヨークを開閉しおこなっていた。そのため、真空引きを 含めた交換作業に5時間以上を要していた。

[成果12]

大容量のターボポンプとイオンポンプを設け、真空引きに要する時間を2時間に短縮した。 大容量のターボ分子ポンプとイオンポンプを設け、カソード交換作業後の真空引きに要する時間 を2時間に短縮することができた。

X線ターゲットの設置精度を数ミクロン以下とし、かつ取り替え時間を10分以下とすること。

電子ビーム軌道中心に正確にターゲットを設置するためのターゲット駆動機構を設計、製作した。機構として、直線導入方式を採用し、原点復帰センサーを備えた。更に、ターゲットの交換を

すばやく行うため(各種観察試料に合わせたターゲットを選定するため)、シンクロトロン本体と切 り離し単独で真空引きが出来るシステムを備えた。

[成果12]

ターゲット駆動機構を新たに設計し試作した(図1-3-5)。交換は10分程度で行うことができた。しかしながら、ターゲットをビーム軌道のセンターに正確に設置できないと言う問題が発生したため、デザインを変更しなければならない。



図1-3-5 製作したターゲット駆動機構の写真。右側が直線駆動機構で横に付いた小さなフランジに原点復帰センサーが内蔵されている。左側のゲートバルブとフランジを介し電 子蓄積リングと接続される。

サブミクロンの解像度を得るために、Johansson 型光学素子を導入して、X線収束点の大きさを10ミクロン以下にする。

X線を集光する方式として、Johansson 型ミラーの検討及びシミュレーションを行った。シミュ レーションは Shadow を用いて行った。製作上の問題として、結晶を分散方向とサジタル方向の双 方に曲げることは、大きな困難が予想された。そこで、今回は、分散方向のみに曲げる集光ミラー を設計した。サジタル方向には、短冊状の多数の結晶を組み合わせることで対応したいと考えて いる。製作は、来年度となる。 5-1) Johansson 型ミラーのための、Si 結晶の切り出し、成形に必要な母型の製作を行う。

[成果13]

Johansson 型ミラーの設計を行った。 焦点距離 65cm で設計。 長さ 20cm 幅 1cm のミラーを次 年度に製作予定。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

氏名:山田 廣成 所属組織名:立命館大学 理工学部 所属役職:教授 Tel: 077-561-2684 Fax:077-561-2680 E-mail:hironari@se.ritsumei.ac.jp

氏名:長谷川 大祐 所属組織名:(㈱光子発生技術研究所 所属役職:主任研究員 Tel: 077-566-6362 Fax:077-566-6368 E-mail:daisuke@photon-production.co.jp

第2章 本論

(㈱光子発生技術研究所が申請している法認定計画では、数ミクロンの解像度を有する 非破壊検査装置と、サブミクロンの解像度を有するX線顕微鏡の開発を目標としているが、 立命館大学を管理法人とする本委託開発で、21年3月末までに実施する研究開発につい て申請した内容と照らし合わせて研究成果の概要を述べる。

2-1 数ミクロンの解像度を有する非破壊検査装置の開発

解像度を数ミクロンにする方法は、電子エネルギー1MeVの卓上型放射光装置を開発し、 電子蓄積リングの電子軌道に設置するターゲットの製造法を改良して、数ミクロンにする事 により達成するものである。

装置の実用化に当たっては、1MeV 電子を発生する電子銃を開発することと、1MeV の電 子を周回させる電子蓄積リングを開発することである。電子エネルギーを 1MeV 以下にす る理由は、管理のために放射線取り扱い主任者を不要とするためである。電子エネルギー を低くするに伴い、電子蓄積リングへの電子ビームの入射が難しくなるので、電子ビームの 入射効率を下げない研究開発が課題である。大電流の電子銃を開発して、入射効率の減 少を補完することと、入射の繰り返しを一桁上げることにより実現する。 装置のメンテ時間 を短縮することも重要な課題であるが、マイクロトロンの電子銃を改良して、カセット方式で 交換する装置を開発する。

X線ターゲットのサイズを数ミクロンにする研究開発(現在は25ミクロン)

ターゲットはコの字型金属製フレームの先端にワイヤーを張り、そのセンターにロッド型や ボール型のターゲットを接着して製作する。フレームの幅が 10mmであり、ワイヤーには、 通常 10 ミクロン程度のカーボンワイヤーを使用している。接着剤には、EPO-TEK 375 を使 用している。このターゲットのサイズを今回の開発で数ミクロンにまで縮小し、支持材には機 械強度が強いとされ、かつ主要成分が炭素である CNT(Carbon Nano Tube)や、ポリイミド 薄膜に注目して研究開発を進めた。

2 - 1 - 1) 現在入手しているボール状ターゲットの最小粒度は、25 ミクロンである。粒子は、パウダーとして生成されるので、さらに細かな粒子の生成と選別を実施する。

造粒技術には様々な物があり、ナノパウダーの製造も盛んであるが、数ミクロンの粒子径 でかつ高密度のものの入手はできていなかった。従来利用してきたデジタルボール法で製 造されたものは、融点の低い材質にしか対応していなかった。また、アトマイズ法で製造さ れたものは、真球度が低く密度も半減するため適していなかった。今回プラズマ放電法で 製造されたものを選定した。TEKNA 社提供の W パウダーは、密度、粒子径とも要求を満 たしていた。

接着剤は、電子顕微鏡試料作成に特化した EPO-TEK375 を用い、電子ビームから受ける損傷を軽減した。

後述する、マニピュレーターを使用し 8µm の粒子をハンドリングし、支持材である CNT に接着する事に成功した(写真2 - 1 - 1)。粒子径を小さくする事によって、高分解能な X 線イメージを確認できた(写真2 - 1 - 2)。また、5µm ターゲットでも十分な X 線強度を確認できた。

更に、ターゲットは自重や電子ビームによる損傷を受け破損(支持ワイヤーの切断による) してしまうが、粒子を小さくする事で寿命は格段に長くなった(約 20 倍)。



写真2-1-1 8µm タングステン球ターゲット。



写真2 - 1 - 2 8µm タングステン球ターゲットの分解能評価。実際に MIRRORCLE に適用して評価を行った。

2-1-2) ターゲットの支持材料に必要な特性としては、X 線の発生が少なく、機械的強度が強いなどが上げられる。X 線の発生を少なくするため、従来から軽元素 C、Be 等を採用してきたが、同時に電子ビームの照射体積を少なくするため、細く薄いものを使用する必

要がある。そこで、主要成分が炭素であるポリイミドの薄膜技術に注目して開発した。ポリイ ミドは機械強度も鋼程度とされている。

産業総合研究所・青柳グループの指導により、100nm 厚のポリイミドフィルムを製作しター ゲット支持材として利用する研究を進めた。ポリイミドフィルムは、基板上では数ナノレベル まで薄く出来るが、剥離してターゲットフレームに自立させている点が特徴である。スピン コートの手法、ベーキング条件、洗いの条件等の検討をおこなった(写真2 - 1 - 3)。写真 2 - 1 - 4が MIRRORCLE のターゲットフレームに接着した写真である。実際の、電子ビー ム照射実験により1週間以上の耐久性を有する事が確認できた。今後、このポリイミド薄膜 に球状ターゲットの固定、または金のエッチングによりターゲットを作成する計画である。





3.2.12 (左)チップの角から剥離するポリイミド (右)余分な部分をカットしたポリイミド

写真2 - 1 - 3 100nm 厚ポリイミド薄膜を支持材として開発した。



写真2 - 1 - 4 100nm 厚ポリイミド薄膜を支持材として開発した。

2-1- カーボンナノチューブ(CNT)の使用を検討しているが、単一の CNT のサイズ は、ナノオーダーであり、破損しやすいことから、この CNT をより合わせた繊維を使用する。 現在、10ミクロンまでの繊維を製作することに成功しているので、数ミクロンを達成目標とし ている。オーストラリアの CSIR にて改善を依頼し、添付写真に示す 6µm のワイヤーの製 造に成功した(添付写真2-1-5)。このワイヤーは数十メートルオーダーで製造が可能で あり特に、より合わせている事で引っ張り強度が上がり破損しにくくなっていると考えられる。 写真2-1-2に示す試験結果は CNT 使用時の結果を示しているが、CNT 自身から来る X 線の発生も少ないことからバックグラウンドの少ない像が得られている。また、寿命もカー ボンワイヤー使用時と比較して明らかに長くなっている。しかし、使用前後の観察(写真2-1-5)からも分かるように、電子ビーム照射により CNT の表面が溶解している事が分かる。 この事が、ターゲットの破損につながっていると考えられる。導電性、及び、電熱性が十分 でないと考えられるため、表面を金属蒸着することで改善する必要がある。



写真2 - 1 - 5 (上)電子ビーム照射前と(下)電子ビーム照射後の 6µm CNT wire の電 子顕微鏡写真。

2-1- X 線ターゲットの微細化に伴い、ターゲット材料の加工技術及び、ハンドリング技術 の高度化が要求された。また、ターゲットフレームへのターゲットの設置精度の向上が要求された。 そのため、専用のマニピュレーターを設計、製作した(写真2-1-6)。ターゲット製作工程は主 に、ターゲット金属の選定(球状の金属の採寸)、加工(ロッド状ターゲットの切り出し)、 支持 ワイヤーへの接着、ターゲットフレームへの接着があるが、各工程で使用できるような設計を 行った。まず、 両工程の作業で必要な視野範囲に対応できるように 0.5 倍、5 倍の 2 種類の 光学レンズを切り替えられるようにした。 では採寸が出来るように採寸機能のソフトを備えた。 では細線のマニピュレーターで1ミクロン程度の金属球のハンドリングも可能となった。さらに、高 倍レンズで観察しながら作業を行う事で、接着剤の量も微調整が可能となった。ターゲットフレー ムへの固定もミクロンオーダーの精度が求められるが、ターゲットフレームの中点を明示できるソフト(写真2 - 1 - 7)を組み込む事で可能となった。以上のカスタマイズで、数ミクロンのターゲットが作成可能になったとともに、作成時間も短縮する事ができた。



写真2-1-6 ターゲット製作のためのマニピュレーター。



写真2-1-7 マニピュレーターの制御画面(ターゲットフレーム中心出し)。

2-2 1MeV 電子エネルギーの卓上型放射光装置の開発

放射光装置の制御は電子エネルギーが低くなるほど難しくなる。高エネルギーの放射光 装置の方が空間電荷の影響が少なく、理論に則った装置となるために開発のリスクが少な い。そのため、我々は卓上型放射光とはいえ 20MeV という高エネルギーの放射光装置を 開発することからスタートし、現在 4MeV まで到達した。そして、4MeV 放射光装置を開発し た経験から、電子エネルギーをさらに低くしても電子蓄積リングへの大電流電子ビームの 蓄積が可能であるという確信を得た。そこで、本事業にて 1MeV 放射光装置(入射器及び 電子蓄積リング)の開発に取り組んだ。

1MeV の卓上型放射光装置の課題は以下の通りである。

1.入射器:

- 1) 磁場の発生には永久磁石を使用
- 2) 大電流電子ビームの発生
- 2.電子蓄積リング:
- 3) 軌道半径 8cm 以下の電子蓄積リングの開発
- 4) 1MeV 用パータベータの開発
- 5) 小型パータベータの製作

以下では上記の各課題についての取り組み及び結果について述べる。

2-2-1) 永久磁石を用いた磁石の開発

1MeV 電子銃はマイクロトロン型の加速器を開発した。マイクロトロン型加速器は電子を

ー様な磁場中で周回し加速するため、高品質で大電流の電子ビームを発生するのに適し ている(図2-2-1)。6MeV のマイクロトロン型加速器を開発した経験によれば、運動エネ ルギーが 1MeV の装置では 500mA のビーム電流が期待できるが、ビームの品質の向上と 小型化のためにマイクロトロンの磁場形状を最適化する必要があった。この課題を克服す るために、従来とは異なり非均一な磁場を用いて電子を制御する方法を取った。既に 1MeV 電子をマイクロトロンで加速するための軌道解析シミュレーションは実施しているので、 本開発では入射器の磁石本体の試作をおこなった。

当初、磁場の発生には永久磁石を用いることを前提に進めたが、1MeV 電子ビームの発 生に最適な磁場強度を作るには、やはりビーム発生中に磁場強度の微調整が必要である ことがわかった。そのため本開発では電磁石を使う方が有利であると判断し、電磁石コイル を用いた磁石を製作することに方針を転換し、開発を進めた。



図2 - 2 - 1 マイクロトロン型加速器の加速のイメージ図。電子は電子銃から放出され、一様磁場 中を周回しながら加速空洞で加速され、所定のエネルギーに達すると取り出される。

1MeV 電子銃用の磁石製作は、真空機器の製作に実績の高い株式会社ティサポートへ依頼した。磁石本体は、磁場を構成する磁石ヨークと真空槽から構成されているが、磁極のフランジ部と 真空槽壁で真空を封じる構造であるため、特別製作品の真空機器を取り扱うティサポートへ製作 を依頼するのが良いと判断した。また、高周波導入部は銅製の導波管部とステンレス製の真空フ ランジ部からなっており、高精度・高信頼性での銀ロウ付けが必要であった。真空度を向上するた めに、電子銃からのガス出しを直ぐに大容量排気速度のターボ分子ポンプで真空引きできるよう、 電子銃正面の真空壁にターボ分子ポンプ用ポートを取り付けられる構造にした。

図2 - 2 - 2に、本研究開発で製作した 1MeV 用磁石の写真を示す。磁場強度を測定し、製作

した磁石にて 1MeV 電子の発生に必要な磁場を発生できることを確認した。

やはり永久磁石を使う方が冷却水を無くすことができ、ランニングコストを下げられるので、 量産機では電磁石ではなく永久磁石を使用することを検討するが、ビーム発生中に磁場調 整をしてビームを制御する必要性がある。そこで将来は、主な磁場の発生に永久磁石を用 い、磁場の微調整は小型の電磁石コイルで補正する構造を検討する。しかしながら、補正 電磁石コイルによる永久磁石の減磁の問題、永久磁石により磁石ヨークが吸着するため開 閉作業が困難になるといった課題がある。



図2 - 2 - 2 製作した 1MeV 電子用磁石。

2-2-2) 大電流の電子ビームの発生

低エネルギーで大電流電子ビームを発生するために、冷却効率が高く、高いQ値(空洞の質を評価する物理パラメータ。Q値=「投入電力」:-「損失電力」)を持つ加速空洞の開発が必要であった。冷却効率を上げるため電流密度が最も高くなり発熱が集中する空洞中心付近に冷却水管を設け、効率的な除熱が可能な構造にした。

製作した新型マイクロトロン加速空洞のQ値を測定したところ 6900 であった。従来の空洞のQ 値が 3000 であるので、二倍近くQ値が向上した。しかしながら、必ずしも高いQ値が得られな かったので、今後さらに改良を要する。

空洞の製作に続き、電子ビーム発生の調整作業を進めているが、現在のところ 300mA のビーム電流を確認している。来年度も引き続きビーム取り出しの調整作業を進め、目標 である 500mA 大電流電子ビーム発生を目指す。

^{2 - 2 - 3)} 軌道半径 8cm 以下の電子蓄積リングの開発 従来の電子蓄積リングでは電磁石のみを使用して磁石を構成していたが、電磁石コイルの冷

却のために冷却水が必要で電子蓄積リングの小型化の妨げになる。そこで、本開発では電子蓄積リングの励磁に永久磁石のみを使用し、磁石本体の軽量化及び装置システムの簡素化を図った。

また、1MeV 電子蓄積リングの小型化のために、電子の周回軌道半径を従来の 15cm か ら、約半分の 8cm に小型化することを目標とした。ここが小型電子蓄積リング開発の重点で あるが、従来機をそのままスケールダウンしたのでは電子の周回効率が低下してしまい、発 生する X線の線量の低下を招く。それを克服するためには、従来機に比べ軌道半径は半 分にスケールダウンするが、電子の周回可能領域は同じサイズに設定することで電子の周 回効率を倍に引き上げることである(図2 - 2 - 3)。さらに、大電流電子ビームの入射効率 を100%にするために、電子蓄積リングの位相空間内での入射可能領域を広げることが必 要となった。これは、先述の周回可能領域と密接な関係があり、周回可能領域を従来機の 倍に広げることで入射可能領域の拡大も可能であることがわかった。1MeV 電子の蓄積リン グへの入射シミュレーションの結果、蓄積リングへの入射可能領域が従来機の3倍になって いることを確認した(図2 - 2 - 4)。



図2 - 2 - 3 電子の周回中心軌道半径は従来機の半分にスケールダウン $(r_1 = r_2/2)$ するが、周回可能領域は従来機と同じサイズ $(A_1 = A_2)$ にすることで周回効率を倍に引き上げる。

電子蓄積リングへの 1MeV 電子の入射シミュレーションと並行して、磁場解析プログラムを 用い電子蓄積リングの磁場を最適化する作業を進めた。過去の実績から、磁場解析プログラムで 求めた磁場と計測した磁場は良い一致を示している。本開発では永久磁石を用いるので、磁極 の微調整で磁場強度の調整ができる構造を検討中である。

以上のように、磁場解析プログラムを用いた磁場計算の試行錯誤の結果、前述のように蓄積リ ングの大きさを半分にしながら、リングへの入射可能領域を従来機の3倍にできることを示唆する 結果を得た。

本年度の研究開発により 8cm の軌道半径に 1MeV 電子が入射可能であることがわかった。来 年度は、電子蓄積リングの磁石の機械設計・製作・磁場の評価をおこなう予定である。



径方向位置 X [mm]

図2 - 2 - 4 1MeV 電子の蓄積リングへの入射シミュレーションの結果。蓄積リングへの入 射可能領域が従来機(赤丸)に比べ 1MeV 装置では黒丸で示すように3倍に広くなってい る。

2-2-4) 1MeV 用パータベータの開発

電子蓄積リングへの 1MeV 電子入射法は 1/2 共鳴入射法を採用した。 共鳴入射法とは共鳴取 り出し法の逆過程をたどり荷電粒子の入射をおこなう方法である。 入射時にパルス摂動磁場発生 装置(パータベータ)を励磁し、水平方向のベータトロン振動に共鳴状態をつくり、パータベータ 磁場を徐々に弱め、荷電粒子を安定周回軌道上(中心軌道)へ導く方法である。

軌道半径 8cm の小型電子蓄積リングでは、入射器で発生したパルス幅 100ns の電子ビームの 入射に必要なパータベータのパルス幅は 160ns となり、パルスジッターを数 ns に抑えることが課 題であった。しかしながら、パータベータ本体も小型化されるため、本体のインダクタンスも半分 になるので特に問題の無いことがわかった。

電子蓄積リングの磁場計算と同様に、磁場解析プログラムを用いて 1MeV 電子の入射に必要 なパータベータ磁場を計算した。その結果を用い、1MeV 電子の入射シミュレーションをおこなっ たところ、入射可能領域が従来機の3倍になることがわかった。別途、計算で求まった 1MeV 電子 銃が発生するビームの位相空間での広がりを表すエミッタンス*(ビームの質を表す物理パラメー タで、値が小さいほど指向性のあるビーとなる。)を、先に求めた電子蓄積リングの入射可能領域 に重ねたところ、入射可能領域内に納まることを確認した(図2 - 2 - 5)。これは 1MeV 入射器で 発生する大電流電子ビームが100%の効率で蓄積リングへ入射可能であることを示している。



図2 - 2 - 5 計算で求めた 1MeV 電子銃が発生するビームのエミッタンス(図中桃線で囲まれた 領域)を先に求めた電子蓄積リングの入射可能領域(図中黒丸)に重ねたところ、入射可能領域内 に納まる。

2-2-5) 小型パータベータの製作

1MeV 電子蓄積リングへの100%の入射効率を達成することがわかったので、小型パータ ベータの製作をおこなった。電子蓄積リングの小型化に合わせ、パータベータ本体の小型化が 要求された。従来の形状をそのままスケールダウンしたのでは機械的な構造に不安が生じた。本 開発ではパータベータの構造を見直し、さらに構造を単純化することに成功し、1.パータベータ を構成する部品点数の省略、2.本体の小型化と簡素化を達成できた。製作したパータベータ磁 場のピーク値を測定した結果、ピークの値、設計に用いた磁場シミュレーションの結果とほぼ同じ 値を示し、実用に際して問題の無いことを確認した。

2-3 入射器のカソードのメンテに必要とされる所要時間を1時間以内に短縮する

2-3-1) カセット式カソードの試作

我々の用いているマイクロトロンは電子銃に外径3mmの単結晶LaB6を用いている。空洞内壁 に設置されたLaB6を1500度まで加熱すると電界放出により容易に電子が飛び出す。これが電 子銃の原理であるが、LaB6を加熱するための熱電子を放出するタングステン製のフィラメントが 別途必要な構造であった。このフィラメントからの揮発が多いい事と、LaB6への熱電子の衝突に よるLaB6の揮発が空洞壁に付着するため定期的に空洞のクリーニング(メンテナンス)が必要で あった。これを解決するために、別体のフィラメントにてLaB6を加熱する構造を見直し、グラファ イトヒータでLaB6を挟み込みLaB6を直接加熱する構造にした。 グラファイトヒータでLaB6を直接加熱できるように、グラファイトヒータの上から板ばね状のアームで押さえ付ける構造にした。また、押さえ込んだ電子銃ユニットと加速空洞の電子銃穴の位置 調整が容易に出来るように、別体の位置調整ジグを製作した。ジグと加速空洞本体には位置決め ピン用の穴を同様に開け、位置合わせを完了した電子銃力セットがそのまま取り付けできる構造 にした(図2-3-1)。

組み立てを完了した電子銃を位置調整ジグ上で電子銃穴との位置合わせをおこない、空洞へ 組み付けたところ、LaB6電子銃の中心位置と深さが 0.025mm 以下の精度で再現していることが 分かった。



図2 - 3 - 1 製作したカセット式カソード。組み立てた後に位置調整が容易にでき、部品ごと加速 空洞へ取り付けられる構造にした。

2-3-2) 大容量真空システムの導入

一方、電子銃の取り付け作業は、入射器の磁石ヨークを開閉しおこなっていた。そのため、真 空引きを含めた交換作業に5時間以上を要していた。本開発により電子銃をカセット式にしたこと で、カソードの交換作業に要する時間が30分に短縮された。交換作業後の真空引きは大容量の ターボ分子ポンプとイオンポンプを設け、真空引きに要する時間を2時間に短縮することができた。

製作した電子銃力セットを加速空洞へ取り付け、グラファイトヒータに流す電流を徐々に上げな がら電子銃のエージングをおこなった。エージング当初はグラファイトヒータ及びLaB6、その他 の電子銃構成部品からのガス出しが見られたが、10時間の連続加熱の後にガス出しは治まった。 ガス出しの後、実際に高周波電力を投入し、グラファイトヒータの加熱電流を調整しながら 20mA のビーム電流を確認した。今後、LaB6の空洞内壁からの深さやヒータ電流を最適化することで ビーム電流の増強を試みる。 2 - 4 X線ターゲットの設置精度(1ミクロン)とスイッチング時間(10分)の短縮

従来の X 線ターゲット駆動機構は、回転機構に6本のターゲットフレームを装着する形 であったが、回転の精度を数ミクロンにすることは困難で、ターゲット位置の再現性に問題 があった。また、ターゲット駆動機構は電子蓄積リングへ直接取り付ける構造で、ターゲット 交換の際には電子蓄積リング本体を真空開放する必要があり、真空大気開放からターゲッ ト交換・真空引きまで 12 時間以上の時間を要した。そのため、ターゲット交換作業はほぼ 一日必要であった。

そこで、本研究開発により、電子蓄積リングとターゲット駆動機構の間に真空を隔てる ゲートバルブが入れられる構造にし、ターゲット交換時にはゲートバルブを閉め、蓄積リン グを大気開放しない構造を採用する。また、ターゲットの駆動には原点復帰センサーを持 つ直線導入器を使用して、ターゲット毎の設置位置の再現性を数ミクロンにすることを目標 とした。

試作したターゲット駆動機構の本体写真を図2-4-1に示す。右側が直線駆動機構で横 に付いた小さなフランジに原点復帰センサーが内蔵されている。左側のゲートバルブとフラ ンジを介し電子蓄積リングと接続される。特徴として、ゲートバルブと真空引きポートを備 えている。シンクロトロン本体と切り離して真空開放が出来る構造となった。そのため、ター ゲットの交換実作業が10分、ターゲット交換後の真空引きに要していた時間が12時間か ら1時間と大幅に短縮することが出来た。駆動方式としては、直線導入方式を採用し原点 復帰センサーを備え、電子蓄積リング内の径方向の設置精度は数ミクロンを達成した。しか しながら、電子蓄積リング本体とターゲット駆動部の取り付け時の設置精度と、ターゲットフ レーム自身の自重による縦方向の位置のずれの問題が発生し径方向以外の設置精度を 達成することは出来なかった。

改善策としては、シンクロトロン本体内部にターゲットフレームの支持台を設置すること。また、ゲートバルブとターゲット駆動機構の間にフレキシブル真空管を入れ、ターゲット駆動 機構設置後に電子軌道位置でのターゲット設置位置を駆動機構ごと外部からアライメント する機構を導入することを検討している。



図2-4-1 製作したターゲット駆動機構の写真。右側が直線駆動機構で横に付いた小さ なフランジに原点復帰センサーが内蔵されている。左側のゲートバルブとフランジを介し電 子蓄積リングと接続される。

2-5 サブミクロンの解像度を有する非破壊検査装置の開発

ミクロンオーダー非破壊検査装置の先端に以下の光学素子を接続して行う。それは、X 線顕微鏡と言って良いレベルの装置となる。

卓上型放射光装置のビームラインとして X 線顕微鏡を構成し、サブミクロンの解像度を出す。

2 - 5 - 1) Johansson 型ミラーの試作

Johansson 型ミラーは、円弧の一部(ローランド円)を形成する形状をしており、円弧の1 端に光源点があり、他端に収束点が有るような結晶ミラーである。結晶軸は、円弧に沿うこと なく、円弧からそれる形となるために、どの場所でも同じ波長のX線を収束する機構ができ る。

X線を集光する方式として、Johansson 型ミラーの検討及びシミュレーションを行った。シミュ レーションは Shadow を用いて行った。製作上の問題として、結晶を分散方向とサジタル方向の双 方に曲げることは、大きな困難が予想された。そこで、今回は、分散方向のみに曲げる集光ミラー を設計した。サジタル方向には、短冊状の多数の結晶を組み合わせることで対応したいと考えて いる。製作は、来年度となる。 2 - 5 - 2) Johansson 型ミラーのための、Si 結晶の切り出し、成形に必要な母型の製作 母型の製作には進むことが出来なかったが、替わりにX線CCDカメラのレンズとして多層膜で 出来たミラーを導入することができた。X線の集光能力が25倍であることを実験で明らかにした。 導入した集光ミラーを図2 - 5 - 1に示す。



図2-5-1 XENOX社から購入した集光ミラーの写真。

第3章 全体総括

本研究開発は、中小企業である(㈱光子発生技術研究所が受けた、「中小企業のものづくり基盤 技術の高度化に関する法律第4条第1項の規定」に基づいて受けた認定にかかわる研究を推進 するために、立命館大学に委託された研究である。3年計画の1年目を実施して、ほぼ計画通りの 成果をえたのでそれを報告したものである。

研究は、溶接技術の向上に資する、X 線を用いた非破壊検査の高度化である。非破壊 検査の対象とし、1)配管溶接部の亀裂観察では、金属中の1ミクロンの亀裂が観測される ことであり、装置を現場に持ち込むことの出来る小型にすることである。また、2)プリント基 板のワイヤーボンディングの欠陥検査では、サブミクロンの欠陥を検査できる装置の開発を 目指している。いわゆるハードX線顕微鏡の開発がテーマである。

1) に関連した研究開発では、微小ターゲットを製作するために、顕微鏡下でターゲットや支持材 を操作できるマニピュレーターの開発を行った。その結果として、ターゲット製作時間が短縮され、 かつ安定に供給できるようになった。最小ターゲットとしては、8µm のボール状タングステンを 5µm のCNTで寄り合わせた糸に接着することが出来た。結果として、イメージの解像度を 5µm ま で向上させることができ、かつターゲットの使用寿命が長くなることを観測できた。この方法で 5µm 以上のターゲット製作方法は確立した。

さらに微小ターゲットを制作する方法として、産業技術総合研究所と共同研究を行い、ポリイミドの薄膜を支持材として使用し、これに 0.1um 以下の微小な金を蒸着した。ポリイミドの薄膜をベーキングし剥離する方法を確立したので、今後、ターゲット支持材として期待される。電子ビーム照射による十分な耐久性も明らかになった。

この開発により、金属内部の 1um 程度の亀裂を観察する事に成功したので、"みらくる"に対す る評価が高まり、発電設備協会が、今後亀裂のメカニズムを研究するためと、実際に発電プラント の検査に使用する準備をしたいという申し入れを受けた。図3 - 1は、2cm 厚 SUS に人工的に 作った亀裂を観察した例である。



図3-1 2cm 厚の SUS 板に人工的に作った亀裂のX線イメージと実物写真。

1MeV 卓上型放射光装置の開発は、実際に、発電プラントの検査や橋梁検査に導入できる小型装置の開発である。

今年度は、主に入射器である 1MeV 電子銃の開発を実施した。横 25cm、幅 20cm の小 型電子銃を製作した。結果、最大で 300mA の電流値発生を記録した。大きさとしては、発 電プラント設備に持ち込むことのできる大きさである。次年度は、電流値 500mA を発生す るための改造を行う。

一方シンクロトロンについては、シミュレーションを行い、電子ビームの入射が可能な、軌 道半径 8cm の解を見つけることができたので、来年度に製作する予定である。図3 - 2は、 開発した 1MeV 電子銃である。



図3-2 製作した横 25cm、幅 20cm の小型電子銃本体の写真。

この研究成果にもとづき、卓上型放射光で、溶接部の 1µm 亀裂を観察できることが実証 され、実際の現場から導入したいという希望が寄せられたのは大きな成果であった。従って、 我々は、早い時期に小型装置を完成して、現場に投入する計画を急ぎたい。装置は、今後、 日本の全ての発電設備を検査する標準装置として位置づけられる物であり、そのための法 的な整備も必要になると考えている。即ち、本装置を用いて全ての発電設備を定期的に検 査する事が、国民の安全・安心を確保する道であると思われる。もちろん、装置開発に対す る支援をお願いしたい。 2) に関連した開発は、サブミクロン解像度ハードX 線顕微鏡の開発である。今年度は、集光光学系の開発を主テーマとして展開し、Johansson ミラーのデザインを行った。サブミクロンの達成はまだ目処が立っていない。来年度は、ハードX 線顕微鏡の開発がメインとなる。一方、最近開発された、XENOX社のミラーをテストした結果、サブミクロンのX 線顕微鏡としても検討する価値が有ると考えている。

以上