

平成 2 2 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「次世代放射線治療装置向け X 線遮へい板の高精度切削加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 3 年 3 月

委託者 中国経済産業局

委託先 財団法人ちゅうごく産業創造センター

目 次

第1章 研究開発の概要

1. 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 放射線治療装置の市場	1
1.1.2 国内メーカーの現状	2
1.1.3 国際競争	2
1.2 研究の目的	3
1.3 研究概要	3
1.4 研究内容及び目標	5
2. 研究体制	8
2.1 研究組織	8
2.2 管理体制	8
2.3 管理員及び研究員	10
2.4 経理担当者及び業務管理者	11
2.5 研究開発推進会議及び事業化検討会委員	11
3. 研究成果概要と運営管理	12
3.1 難切削材切削技術高度化への対応	12
3.2 異種材料接合、複合素材加工への対応	12
3.3 最薄化への対応	13
3.4 プロジェクトの運営管理	13
3.4.1 研究開発進捗管理	13
3.4.2 研究開発の連絡窓口	13

第2章 本 論

1. 難切削材切削技術高度化への対応	15
1.1 研究目的	15
1.2 研究内容	15
1.2.1 加工時間の短縮	15
1.2.2 加工機の高精度高速化技術の開発	15
1.2.3 タングステン合金の内部応力への対応	15
1.3 研究成果	15
1.3.1 加工時間の短縮	15
1.3.2 加工機の高精度高速化技術の開発	17
1.3.3 タングステン合金の内部応力への対応	20

2. 異種材料接合，複合素材加工への対応	2 2
2.1 研究目的	2 2
2.2 研究内容	2 2
2.2.1 異種材料接合化技術の確立	2 2
2.2.2 構造Y細工の設計・製作	2 2
2.2.3 L装置等による溶接技術の検討	2 2
2.2.4 異種材料接合材の同時精密加工技術の確立	2 2
2.3 研究成果	2 2
2.3.1 タングステンと異種金属材料の接合	2 2
2.3.2 構造Y細工の設計・製作	2 3
2.3.3 L装置等による溶接技術の検討	2 3
2.3.4 異種材料接合材の同時精密加工技術の確立	2 4
3. 最薄化への対応	2 5
3.1 研究目的	2 5
3.2 研究内容	2 5
3.2.1 K治具による高精度加工技術の開発	2 5
3.2.2 傾斜・回転テーブルによる効率的な高精度加工技術の開発	2 5
3.3 研究成果	2 5
3.3.1 K治具による高精度加工技術の開発	2 5
3.3.2 傾斜・回転テーブルによる効率的な高精度加工技術の開発	2 7
4. プロジェクトの運営管理	3 6
4.1 研究開発推進会議及び事業化検討会の開催	3 6
4.2 取得財産	3 8

第3章 その他

1. 研究発表・講演発表	3 9
2. 論文投稿	3 9
3. 特許の状況	3 9
4. プレス発表	3 9

第4章 全体総括

1. 研究目的及び概要	4 0
2. 研究成果	4 0
2.1 難削材切削技術高度化への対応	4 0
2.2 異種材料接合、複合素材加工への対応	4 0
2.3 最薄化への対応	4 1

第1章 研究開発の概要

1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

1.1 研究の背景

1.1.1 放射線治療装置の市場

高齢化を背景に、がん罹患者数及び死亡者数（図 1.1-1）は増加の一途である。また、我が国では、がん患者の大半が胃がんであったが、最近では、肺がんや前立腺がんといった欧米型のがんが増えるなど多様化しており、これまで手術一辺倒であったがん治療も多様化を図る必要が生じている。

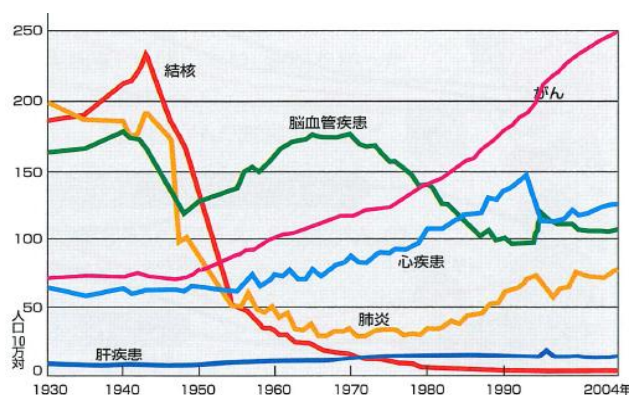


図 1.1-1 疾病別死亡率の推移（出典：人口動態統計 厚労省(2004 年)）

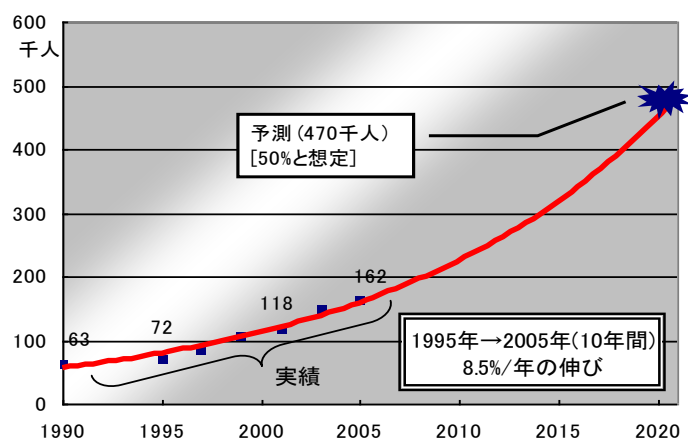


図 1.1-2 放射線治療患者数の推移（出典：J A S T R O 定期構造調査）

その中で、高齢者ががんの増加や、クオリティ・オブ・ライフ（生活の質）の高い治療への社会的要請、放射線治療そのものの進歩により、放射線治療を希望する患者（図 1.1-2）は年々増えてきている。現在、わが国では放射線治療を希望する患者は約 25% であるが、

今後、欧米並みの 60 %程度になるとの予想もあり、この増加する放射線治療患者への対応の為、相応の治療装置数が必要となってきた。治療装置の新規及び更新需要を勘案すると、日本国内で 100 台／年、世界市場においては、1,000 台／年程度の需要が見込まれており、早急に市場競争力を高めていく必要がある。

1.1.2 国内メーカーの現状

放射線(X線)治療装置を製造している国内メーカー(初期投資及び運営費用が桁違いである粒子線治療施設は除く)は三菱重工業(株)だけである。同社は 2002 年から放射線治療装置の開発に着手し、基本的なモデルであるリング型放射線治療装置(MHI-TM1000)の開発に成功し、2006 年 2 月に薬事承認を取得した。その後も研究開発を継続し、最先端画像誘導放射線治療装置(Image Guided Radiotherapy Machine)である MHI-TM2000 を開発(写真 1.1-1)し、2008 年 1 月に薬事承認を取得した。



写真 1.1-1 三菱重工業(株)が開発した最先端画像誘導放射線治療装置(MHI-TM2000)

(提供：三菱重工業(株))

1.1.3 国際競争

放射線治療装置は、年間 2～3 台のペースで納入されており、現在では、欧州に 3 台、米国に 1 台納入済みである。世界的な放射線治療装置の市場の現状は、バリアン(米)、エレクタ(スウェーデン)、シーメンス(独)、ブレインラボ(独)、アキュレイ(米)、トモセラピー(米)の 6 社でほぼ寡占されている。三菱重工業(株)が開発した装置(MHI-TM2000)はその技術において、国内外で脚光を浴びているが、市場での競争に打ち勝つ為には価格面での一層の努力が求められており、絶え間ない研究開発による放射線治療装置の高度化とコストダウンの両面が大いに望まれている。

1.2 研究の目的

高齢者ガン患者の増大を背景に、医療の多様化が求められている中、放射線治療を希望する患者が年々増加しているが、現在の放射線治療装置市場は海外メーカーに寡占されており国産の放射線治療装置ほとんど実績がない状態である。

本研究において放射線治療装置の主要部品であるマルチリーフコリメーターに内蔵されているX線遮へい板を高精度切削する技術や、X線遮へい板に接合部材を適用するための技術等を確立し、高精度照射が可能で低コストなX線遮へい板を開発する。これにより低コストで高精度な国産放射線治療装置の開発が可能となり、医療機器分野における我が国の国際競争力の向上の一翼を担う。

1.3 研究概要

放射線治療装置による治療のイメージ図は図 1.3-1 に示す通りである。X線源からの放射線は放射線治療装置のマルチリーフコリメーターに内蔵されているX線遮へい板により制御されて癌患部に照射させる仕組みである。

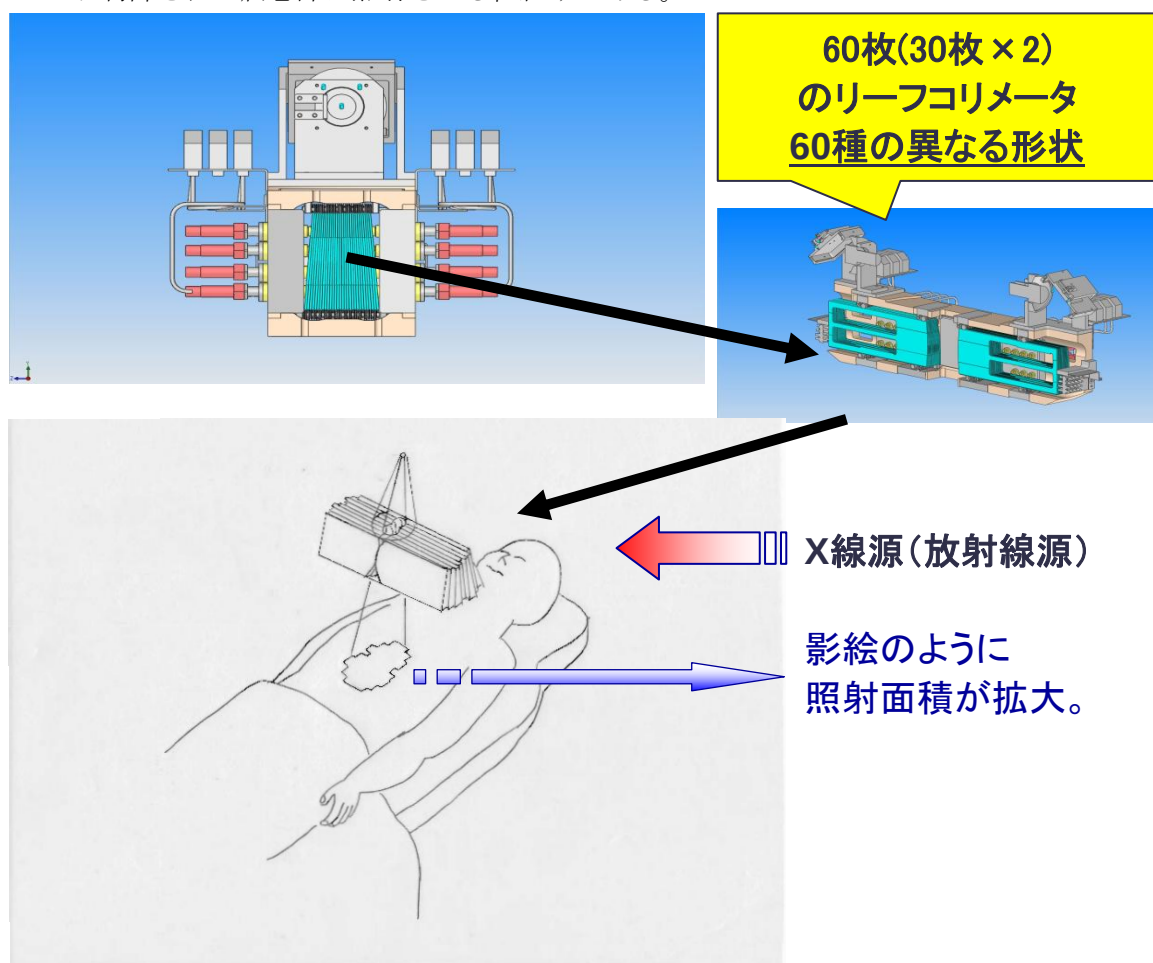


図 1.3-1 放射線治療のイメージ図 (上記 2 装置の図は提供：三菱重工業㈱)

マルチコリメーターに内蔵されているX線遮へい板は図 1.3-2 に示す形をしており、現在の厚さは 2.5mm である。X線遮へい板はX線を完全に遮へいする必要があるので、その部材はタングステンである。

しかし、タングステンは高価な難削材であるため、加工する際には長時間かけて慎重に行う必要があることや、加工に使用する工具が短時間で摩耗すること等の問題点があり、X線遮へい板の作製コストを高める原因となっている。

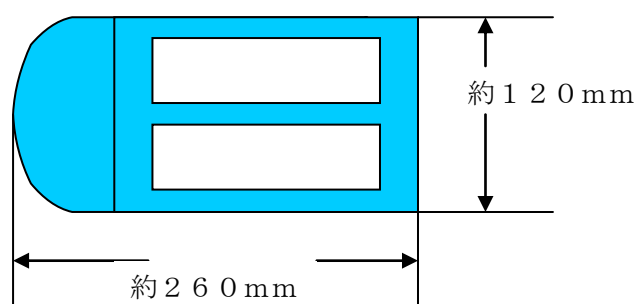


図 1.3-2 X線遮へい板の形

また、ガン患部へのX線の照射範囲を高精度に制御するためには、X線遮へい板をできる限り薄くする必要があるが、現在の加工技術では、薄肉化技術に限界がある。これらの問題点を解決するため、本プロジェクトでは、タングステンの切削技術高度化、X線遮へい板を異種接合材に変換するための異種材料接合化技術、薄肉化技術の3研究課題について研究開発を推進し、実用化を段階的に実施することを目指す。各課題の概要は下記のとおりである。

①難削材切削技術高度化への対応

本研究課題では、タングステンの切削技術の高度化に関する研究を推進し、加工時間の短縮や高精度な加工機の開発を目指す。本研究により、事業化の第1段階として、国産の放射線治療装置に搭載できる現状より低コストのX線遮へい板の開発を目指す。

②異種材料接合、複合素材加工への対応

現在のX線遮へい板は高価なタングステンのみを使用して作製されているため、高コストとなっている。そのため、本研究においてタングステンと安価な異種材料接合化技術を開発し、国産の放射線治療装置に搭載できる異種接合材を使用した低コストのX線遮へい板の開発を目指す。さらに、異種接合材専用の加工技術についても研究開発を行う。

③最薄化への対応

ガン患部へのX線照射範囲を高精度で制御するため、X線遮へい板の最薄肉加工技術を開発し、国産の放射線治療装置に搭載させることを目指す。

1.4 研究内容及び目標

具体的研究内容及び目標は、次のとおりである。

①難削材切削技術高度化への対応

①－１ 加工時間の短縮

現状の一般鋼材に対して、数倍の加工時間と費用を要するタングステン材単体について、加工時間半減を目指して、D 工具、C 工具等とそれらの刃物形状、加工条件を改良し最も歪の少ない高精度な加工方法を開発する。

また、加工時間の短縮によるコストダウンを図るため、タングステンの切削技術開発を行ない、開発した高精度な加工機を使用し、現状仕様レベルの X 線遮へい板を低コストで製作する技術を開発する。

①－２ 加工機の高精度高速化技術の開発

現在の平面度を更に向上させることを目指した切削実験を行うため、高精度加工機『ナノ門形加工機』の設計試作及び機能確認を実施する。

①－３ タングステン材の内部応力への対応

新たな課題となったタングステン材の内部応力を減少させる方法を開発し、薄肉化した X 線遮へい板を精度よく加工するための開発に繋げる。

②異種材料接合、複合素材加工への対応

②－１ 異種材料接合化技術の確立

高価なタングステン材単体使用に対して、タングステン－低価格素材等の異種接合材へ転換することで、素材費（コスト）をある程度に削減するため電子ビーム溶接機を使用した実験を行う。

②－２ 構造 Y 細工の設計・製作

薄板を強固に接合するため、構造 Y 細工的な機械的組合せによる接合を行った後、溶接接合することを考えており、構造 Y 接合技術について、基本設計および試作を行い、性能評価を行う。

②－３ L 装置等による溶接技術の検討

最適な溶接条件の探索のため、電子ビームに匹敵するエネルギー密度で溶接を高精度に行なえる最新のナノ制御ファイバー L 加工装置を製作し、異種材料との高品位溶接の条件を探る。

②－４ 異種材料接合材の同時精密加工技術の確立

切削加工作業の効率化を図るため、タングステン材と S 材を構造 Y 組合せした接合材を同時に効率的に切削加工するための技術開発を行う。

③最薄化への対応

③－１ K 治具による高精度加工技術の開発

開発製作したナノ門形加工機を使ってX線遮へい板を薄肉加工するためには、薄肉素材を保持する治具(本研究課題ではK治具と称する)が必要不可欠であるため、実仕様のX線遮へい板を高精度に保持できるK治具を設計・製作する。

製作したK治具を用いて実仕様遮へい板(タングステン単身材及びタングステンとS材の接合材)の切削加工試験を行い、目標の加工精度、目標の切削加工時間(実仕様規模のタングステン単身材の3倍以下)を満足する技術の開発を行う。

③-2 傾斜・回転テーブルによる効率的高精度加工技術の開発

多数のX線遮へい板を短時間で高性能に加工するためには、傾斜・回転テーブルの開発が必要であるため、傾斜と回転の2軸同時加工機能を有する傾斜・回転テーブルの基本設計及び製作を行う。

そして、製作した傾斜・回転テーブルをナノ門形加工機に設置し、実仕様遮へい板(タングステン単身材及びタングステンとS材の接合材)の切削加工試験を行い、目標の加工精度、目標の切削加工時間(実仕様タングステン単身材の3倍以下)を満足する技術の開発を行う。

さらに、以上の技術的検討の他、既存のX線遮へい板とのコスト比較評価を実施する。

④プロジェクトの運営管理

④-1 研究開発進捗管理

共同研究体構成員との連携・調整および研究開発等に係る打合せを適宜実施して、事業の進捗状況把握、研究開発課題への迅速対応等によりプロジェクトの進捗管理を行う。

また、研究開発で取得する機械装置等については、適正な経理処理に努めるとともに、取得後においては、管理台帳等により適正な管理を行う。

④-2 研究開発推進会議及び事業化検討会の開催

構成機関全体による研究開発推進会議および事業化検討会を定期的を開催して、研究開発全体の進捗状況の把握、研究開発の円滑・推進を図る。

④-3 成果報告書の編集等とりまとめ

研究開発成果について、報告書作成の編集及びとりまとめを行う。

研究実施場所

上記①～④の研究開発実施場所

〔事業管理者〕

財団法人ちゅうごく産業創造センター(最寄り駅:広島電鉄 中電前)
〒730-0041 広島市中区小町4番33号中電ビル2号館

〔再委託先〕

オオタ株式会社(最寄りバス停:両備バス 鉄工センター前)
〒701-0145 岡山県岡山市北区今保82

秋山鉄工株式会社（最寄り駅：ＪＲ羽越本線 鶴岡駅）
〒997-0011 山形県鶴岡市宝田 1-1 0-1

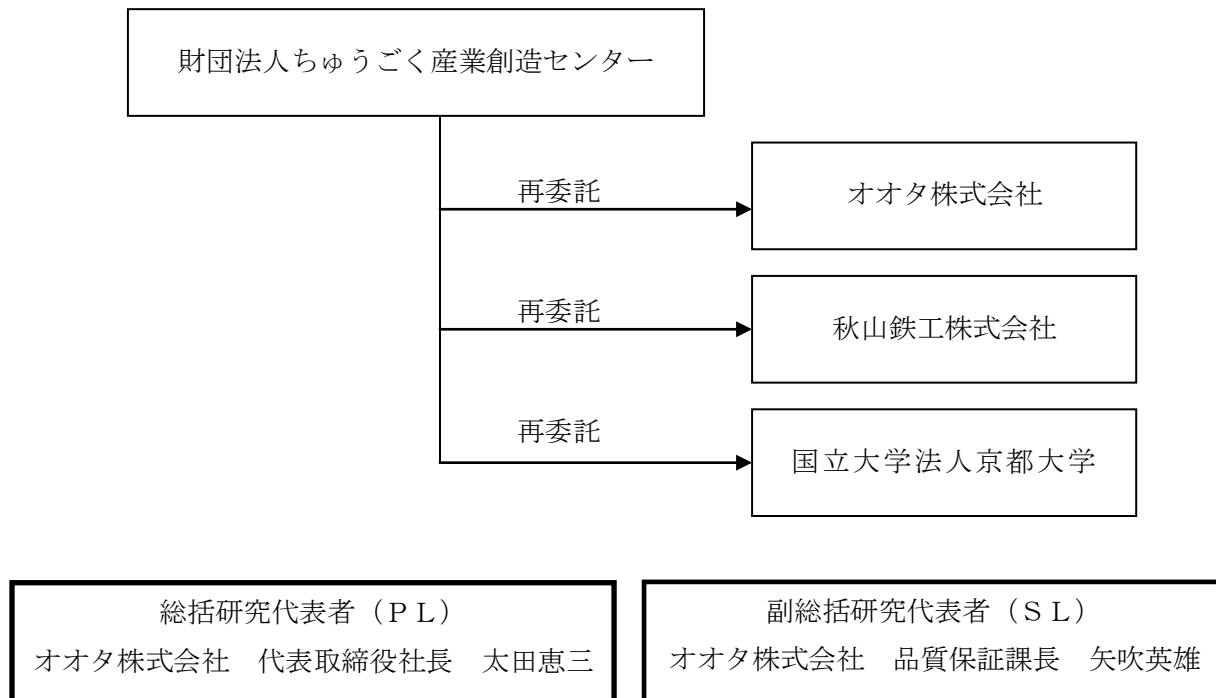
国立大学法人京都大学（最寄りバス停：京都市営バス 京大正門前）
〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町

委託期間

平成２０年１０月２７日 から 平成２３年３月３１日 まで

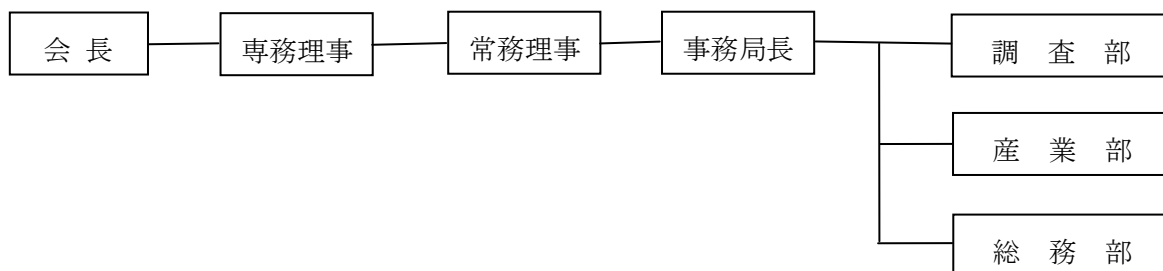
2. 研究体制 (平成22年度時)

2.1 研究組織



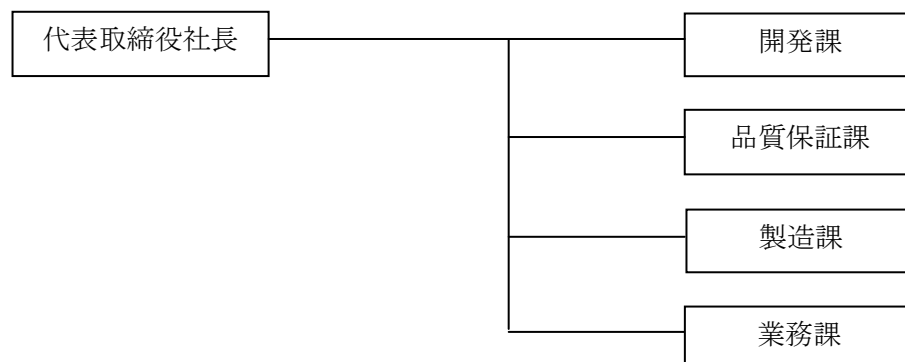
2.2 管理体制

2.2.1 事業管理者 [財団法人ちゅうごく産業創造センター]

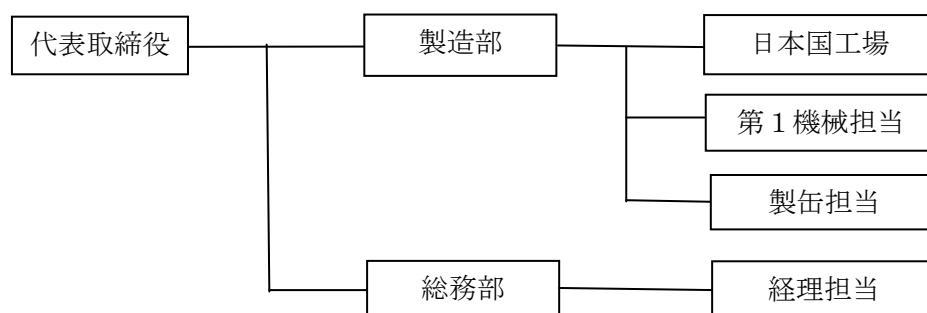


2.2.2 再委託先

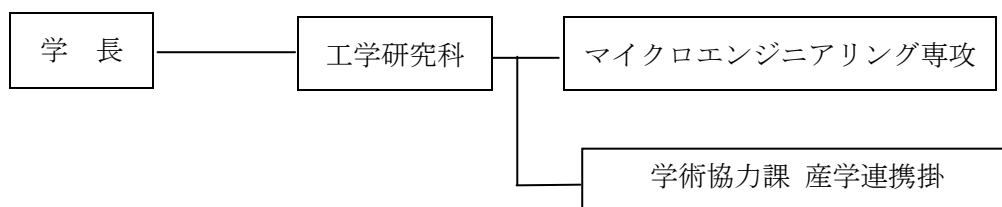
オオタ株式会社



秋山鉄工株式会社



国立大学法人京都大学



2.3 管理員及び研究員

2.3.1 管理員（プロジェクト管理）

【管理法人】財団法人ちゅうごく産業創造センター

管理員

氏 名	所属・役職
佐々木 暁	常務理事 事務局長
平野 義男	産業部 産業創出部長
山田 勝彦	産業部 部長
寿藤 政人	産業部 部長

2.3.2 再委託先研究員

オオタ株式会社

氏 名	所属・役職
太田 恵三	代表取締役社長
矢吹 英雄	品質保証課 課長
中藤 康行	製造課 担当者
田村 真二	製造課 担当者
杢田 茂	製造課 担当者
中村 孝道	製造課 担当者
清水 健司	製造課 担当者
馬生 文夫	製造課 担当者
石塚 甲太	製造課 担当者

秋山鉄工株式会社

氏 名	所属・役職
秋山 周三	代表取締役
日下部 博	取締役 総務部長
太田 多喜男	製造部 日本国工場 工場長
五十嵐 知也	製造部 日本国工場 担当者
石井 庸介	製造部 日本国工場 担当者
秋山 滋	製造部 日本国工場 担当者
吉住 好広	製造部 第1機械担当 主任
今井 悟	製造部 第1機械担当 担当者
八幡 収一	製造部 製缶担当 担当者

国立大学法人京都大学

氏 名	所属・役職
松原 厚	京都大学大学院工学研究科 マイクロエンジニアリング専攻 精密計測工学研究室 教授

2.4 経理担当者及び業務管理者

(事業管理者)

財団法人ちゅうごく産業創造センター

(経理担当者) 総務部 部長 土井 早苗

(業務管理者) 常務理事 事務局長 佐々木 暁

(再委託先)

1) オオタ株式会社

(経理担当者) 業務課 課長 太田 順子

(業務管理者) 代表取締役社長 太田 恵三

2) 秋山鉄工株式会社

(経理担当者) 経理担当 担当者 秋山 桂子

(業務管理者) 取締役 総務部長 日下部 博

3) 国立大学法人京都大学

(経理担当者) 工学研究科学術協力課産学連携掛長 當麻 公子

(業務管理者) 大学院工学研究科 マイクロエンジニアリング専攻
精密計測工学研究室 教授 松原 厚

2.5 研究開発推進会議及び事業化検討会委員

氏 名	所属・役職	
太田 恵三	オオタ株式会社 代表取締役社長	P L
矢吹 英雄	オオタ株式会社 品質保証課 課長	S L
秋山 周三	秋山鉄工株式会社 代表取締役	
松原 厚	国立大学法人京都大学 大学院工学研究科 教授	
熊野 友城	三菱重工業株式会社 機械・鉄構事業本部 機械事業部 資材部 機械調達・外注課 運搬機・製鉄・新製品チーム	アドバイザー
杉本 喜雄	三菱重工業株式会社 機械・鉄構事業本部 機械事業部 新製品部 医療システム技術課 課長	アドバイザー
沓名 宗春	(株)最新レーザー技術研究センター 代表取締役	アドバイザー
村上 浩二	岡山県工業技術センター 研究開発部 金属・加工グループ 研究員	アドバイザー

3. 研究成果概要と運営管理

3.1 難削材切削技術高度化への対応

難削材の切削において、工具材料と刃先形状の違う 4 種類の切削工具で切削加工試験を行い、切削抵抗の低い工具を候補として選定し、さらに工具摩耗を検証して最適工具を選定した。

本工具及び最適切削条件により、タングステン合金の X 線遮へい板を製作した結果、加工時間が従来と比べて大幅に短縮できることとなり、また、工具費も大幅に低減できることを確認した。

タングステンを精密加工する前処理として、基準面作製のためタングステンを研削したところ、研削速度により残留応力が変化すること、素材メーカーの特性説明ではないとしていた内部応力が存在することがわかり、研削・切削など加工工程全般の新たな課題として取り組む必要がでてきた。したがって、内部応力を低減する目的で通常行われる熱処理をタングステン合金メーカーの推奨条件で実施し、その後、X 線による残留応力の測定を行った。その結果、熱処理によっては、内部応力を低減することが困難であることが判った。このため、今後の研究開発では、内部応力が存在することを認識した上で、切削技術により対応することとした。

さらに、弱磁性体であるタングステンを保持する治具として、真空引きによる保持機構を持つ真空チャックの一部を試作した。

高精度・高効率化加工のためには、加工機の工夫も必要であり、加工主軸の制御単位の高精度化を実現するため、従来のボールネジ駆動からリニアモーター駆動を装備したナノ門形加工機を製作した。

3.2 異種材料接合、複合素材加工への対応

リーフ材料のコストダウンを狙い、タングステンと異種材料を接合するための溶接接合および構造 Y 細工による機械式接合を組み合わせた技術を実現するため、基本的な研究開発を進めた。

タングステンと異種材料の溶接接合は困難とされていたが、電子ビーム溶接で複数の異種材料に対して試み、S 材が溶接接合できる可能性が高いことがわかった。また、寄木細工については、基本設計および試作を行い、構造 Y 細工単独でも十分な強度を持つことが確認できた。

さらに高精度かつ高効率な溶接技術を開発するため、新たに L 溶接装置を製作設置し、L 溶接技術の開発を行った。本溶接技術では、電子ビーム溶接と違って、大気圧下で作業ができると共に、さらに高精度な溶接が可能であることが確認した。

L 溶接装置を用いて試験片および実仕様遮へい板（タングステン単身材及びタングステンと S 材の接合材）の溶接試験を行い、目標接合強度を満足する結果を得られた。

3.3 最薄化への対応

最薄化技術を開発するためには、要素技術として、薄い板に歪みを与えない状態で固定する技術が不可欠である。これは、加工時に対象物を動かないように固定する必要があり、その際に変形を与えると、加工によるものか素材の加工前から与えられた変形か区別がつかず、高精度加工条件の良否を判断することができなくなるためである。

そこで、この問題を解決するために、X線遮へい板を保持できる大きさのK治具を製作し、所定の性能があることを確認した。

さらに、本K治具を使用してX線遮へい板の試作を行った結果、現状のX線遮へい板を高精度に製作でき、目標の加工精度をクリアすることができた。

また、最薄化X線遮へい板を効率的かつ高精度に加工するため、傾斜と回転が同時に行える2軸機構の傾斜回転テーブルが必要であるため、本装置の仕様検討と基本設計を行った後、高性能の傾斜・回転テーブルの製作した。

製作した傾斜・回転テーブルをナノ門形加工機に設置し、最薄化のX線遮へい板（タングステンとS材の接合材）の目標の加工精度、目標の切削加工時間（実仕様タングステン単身材の3倍以下）を満足する技術の開発を行うため、事前評価の為に、予備切削加工試験を行ったが、切削中にタングステン合金が飛んで破損するという結果を得て、切削試験は中断したが、総合的な技術的検討において、既存のX線遮へい板との加工時間評価を実施し、推定値も入るが計画通りの3倍以内の加工時間に入ることを目安を得た。

3.4 プロジェクトの運営管理

3.4.1 研究開発進捗管理

共同研究体構成員との連携・調整及び研究開発等に係る打合せを適宜実施して、研究の進捗状況をPLと連携しながら把握するとともに、研究開発課題への迅速な対応等によりプロジェクトの運営管理を行った。

また、構成機関全体による研究開発推進会議および事業化検討会を合計3回開催し、研究開発全体の進捗状況の把握、課題の抽出・検討、そして研究成果の事業化計画等の確認を行うことにより、研究開発の円滑・推進を図った。

研究開発で取得する機械装置等については、適正な経理処理に努めるとともに、取得後においては、管理台帳により適正な管理を行っている。

3.4.2 研究開発の連絡窓口

当該研究開発に関する各年度連絡窓口は、下記のとおりである。

〒730-0041

広島市中区小町4番33号 中電ビル2号館

財団法人ちゅうごく産業創造センター

産業部 部長（平成 20 年度）山中 康司
部長（平成 21 年度）平野 義男
部長（平成 22 年度）山田 勝彦

電話：082-241-9943

F A X：082-240-2189

E-mail：zdyamada@pnet.gr.energia.co.jp

第2章 本 論

1. 難削材切削技術高度化への対応

1.1 研究目的

切削技術の精密化と高度化による難削材切削技術の高精度化を目標とし、初年度は現状の寸法における難削材の加工技術の開発を行う。また、加工技術の高度化を行うために、加工機械の超高精度加工機を試作開発し、実用できる加工機に仕上げることを目的とする。

1.2 研究内容

1.2.1 加工時間の短縮

現状の一般鋼材に対して、数倍の加工時間と費用を要するタングステン合金単体について、加工精度の向上と加工時間の半減を目指し研究開発を実施した。平面の高精度な加工条件を実現するため、切削条件決定に関する研究を実施した。

1.2.2 加工機の高精度高速化技術の開発

加工精度を目指した切削実験を行うため、高精度加工機『ナノ門形加工機』の設計試作及び機能確認を実施した。

1.2.3 タングステン合金の内部応力への対応

高精度切削の前提条件となるタングステン合金の内部応力について、検討をした。

1.3 研究成果

1.3.1 加工時間の短縮

1.3.1.1 切削条件決定に関する研究

(1) はじめに

タングステンのエンドミル加工において高精度で高能率な切削加工条件を決定するために工具材料と刃先形状の影響を調べることにした。

(2) 実験条件と実験方法

刃先形状については図 1.3-1 に示すように、すくい角の影響を検討する必要がある。本実験では、A～C の 3 種類の工具を用いて、切削性と工具摩耗の観点から工具材料の選定指針を得る。

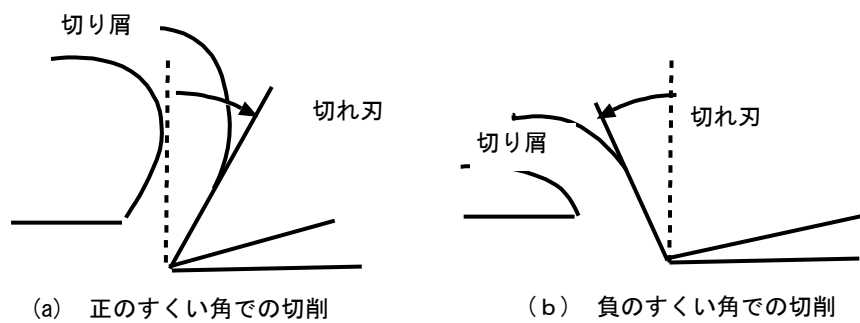
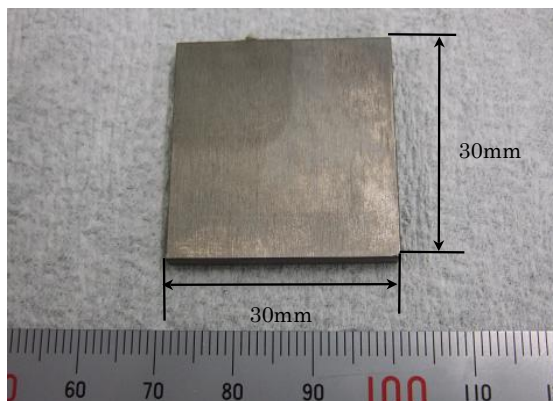


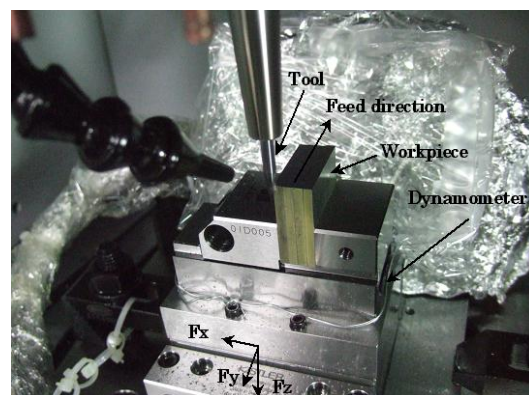
図 1.3-1 工具刃先形状（概念図）

D 工具は刃先形状の制約から、底面全面をかけた加工条件が難しいと判断されたので、半径方向切り込みを工具径の一定割合とした切削加工条件で実験を進めた。

図 1.3-2(a)に試験片、(b)に実験のセットアップを写真で示す。動力計上に小型バイスを設置しタングステンを厚み方向に挟んだ。



(a) 試験片の写真



(b) 実験の外観

図 1.3-2 実験セットアップ

(3) まとめ

結果を以下にまとめる。

工具材料と刃先形状の違う 3 種類の切削工具で切削加工試験を行い、切削抵抗の低い工具を候補として選定し、さらに工具摩耗を検証して最適工具を選定した。

1.3.1.2 真空チャック用の簡易真空発生装置

(1) 検討結果

タングステンは弱磁性体のため、磁石で保持する事ができない。そこで製品面製作、製品反対面製作に必要となる真空チャックを製作した。その真空チャックにタングステンを装着したものを写真 1.3-1 に示す。

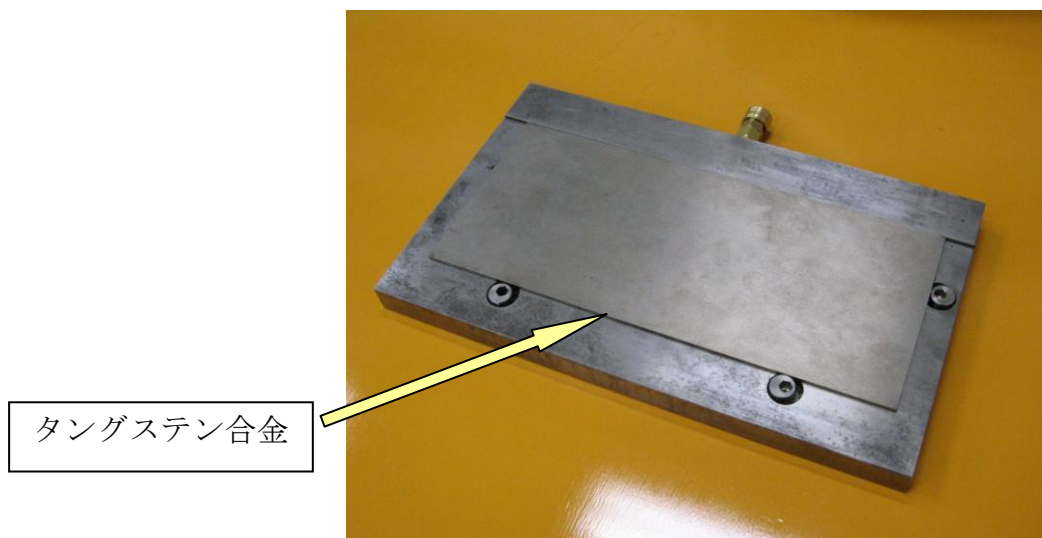


写真 1.3-1 開発した真空チャックにタングステンを装着

タングステンを切削する際にかかる力は、吸着方向と同じ方向の押し付け分力 F_z が働くため、真空引きによる吸着力は、加工するタングステン自重と強い相関がある。

1.3.2 加工機の高精度高速化技術の開発

(1) 研究結果

本研究開発の主たる目的は、低コストで高品位なリーフの製作である。そのためには、安定的な高度切削技術の確立と同時に、低コストで加工の量産を可能とする高精度高速加工機（ナノ門型加工機）の製作を行なった。具体的には、ナノレベルの高精度制御を可能とし、高速加工に対応できる加工機の企画・設計を行った。無人化によるコスト低減を想定し、本加工機にはテーブル交換スペースを配置した。1つのテーブル上に多数のタング

ステンリーフが同時に段取りできるスペースを持たせ、十分な切削移動距離を確保できるように設計した。本加工機の開発により、人件費コストの低減が期待でき、高精度かつ低コストな製品製作に役立つと考えている。

（２）開発したナノ門型加工機の主な構成

開発したナノ門型加工機の主な構成は下記の通りである。

- a. ストローク： X Y Z の３軸
- b. 作業テーブル： 500mm×800mm
- c. 駆動軸： X 軸, Y 軸を各駆動

（３）高精度ナノ門型加工機による加工試験

タングステンの切削性と製作したナノ門型加工機の加工性能評価のため、ナノ門型加工機を使用してタングステンに穴を開け試験を実施した。（写真 1.3.2）



写真 1.3-2 加工結果

写真 1.3-3 にナノ門形加工機で写真 1.3-4 に他の機械ドリルで加工した開口部の拡大写真を示す。他の機械ドリルでは、入り口のカエリが大きく大きな抵抗がかかっていることが分かる。なお、象限突起は、目視では確認できなかった。

また、写真 1.3-5 にナノ門形加工機で切削した切屑を示す。切屑の形状が比較的そろっていて、安定的に削れていることがわかる。

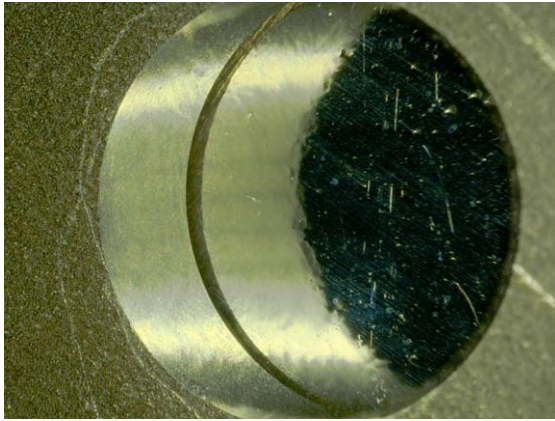


写真 1.3-3 タングステンの穴加工面を斜めから見たところ。



写真 1.3-4 一般の機械で加工した例（穴の面が粗いことが分かる）



写真 1.3-5 切削屑

1.3.3 タングステン合金の内部応力への対応

(1) はじめに

精度の高い基準面製作が高精度の加工に重要であるが、難切削材であるタングステンは切削の条件があきらかでないため、高精度な平面を作成する技術の検証が必要である。

今回、試作材料の研削を行い、三次元測定器で計測をしたところ、研削による除去量の半分程度の歪みが生じて、平面度を保てない現象が起こった。このような現象が発生することは想定外であり、材料の内部応力や残留応力の影響が考えられる。素材メーカーの材料特性に関する説明では『内部応力や残留応力等は、素材を1500°まで加熱しているもので、ほとんどない。』という説明を受けていたが、説明とは全く異なる現象が起きた。

(2) タングステン合金の内部応力への対応

タングステンに高い内部応力が存在することが判明した。

内部応力は高精度加工の妨げになるため、内部応力の大きさを低減することが必要となった。

今後、新たな課題として、高精度な加工のため、熱処理による内部応力の低減を検討する必要がある。そこで、高精度加工を実施するために、内部の残留応力の分布状態が均一でバラツキのないことが望ましいことから、本研究において、通常行われている熱処理をタングステン合金の素材に実施することで、内部応力の均一化の実現を図ろうとするものである。

タングステン合金素材を10ミリ角厚さ3mmの試験片とし、素材メーカーの推奨条件の熱処理条件で加熱、高温保持、長時間かけての炉内冷却、以上の処理を施し、その試験片をX線応力解析装置で内部の応力を測定した。

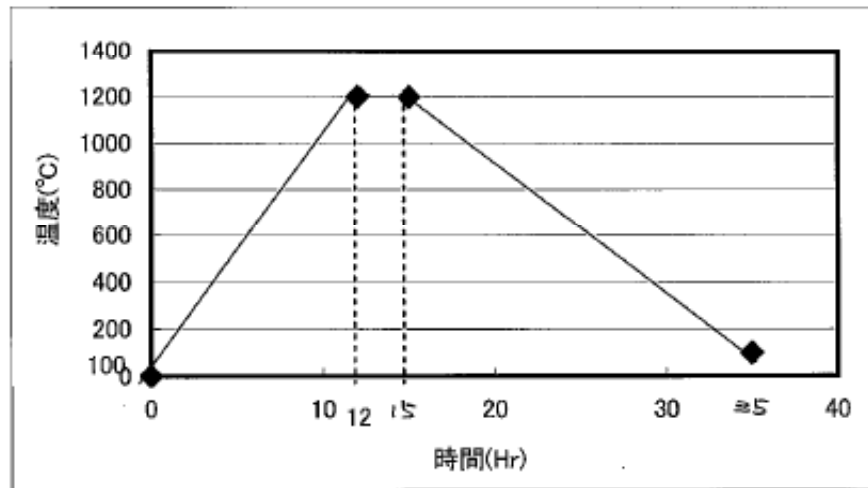


図 1.3-3 熱処理パターン

(2) — 1) 熱処理の具体的条件

加熱 12 時間で 1200°C、3 時間炉内保持、以後 1 時間当り 50°C 以下の降下温度で炉内冷却を実施し 70°C で大気解放した。

(2) — 2) 内部応力の測定結果

X線応力解析装置 (XRD) で、内部応力を表面の表裏、さらに中間部分の応力を計測した。表面及び裏面を鏡面にラッピングを行いX線応力解析装置で応力を計測した。その後、板厚の中心部も同様に、中心部まで削り込んだ後、鏡面にラッピングを行いX線応力解析装置で応力を計測した。

その結果から、明らかに熱処理前と熱処理後で残留応力が下がっているとは言いがたい。むしろ、残留応力のバラツキからは熱処理前の方が、熱処理後よりバラツキは少ない。結論として、熱処理による内部応力解放は困難である。

2. 異種材料接合，複合素材加工への対応

2.1 研究目的

リーフ材料のコストダウンを図るため，タングステンと安価な異種材料の接合技術の開発を行う。

2.2 研究内容

2.2.1 異種材料接合化技術の確立

タングステン合金とS鋼材料との溶接は，前例がなくY点が大きく違う等から溶接ができないとされていた。

電子ビームによる溶接接合を試み，溶接条件の最適条件を探るための試験を実施し，溶接特性を分析・評価した。また最新技術のL装置を製作し同様に接合方法を検討した。

接合強度については，異種材料接合により，先端のタングステンの重量と安全係数とから目標を定め，研究開発を進める。

2.2.2 構造Y細工の設計・製作

タングステン合金とS鋼材料との溶接が困難と想定されるので接合強度を機械的な結合を目指して構造Y細工をまねた設計と製作を試みた。

2.2.3 L装置等による溶接技術の検討

最新技術のL装置を製作し溶接接合を試み，溶接条件の最適条件を探るための試験を実施し，溶接特性を分析・評価した。

2.2.4 異種材料接合材の同時精密加工技術の確立

小径工具は高精度加工に有利であるが，切削時間が長時間化しコスト面で不利となる。高精度とコストダウンを両立させる加工技術の考察を行った。

2.3 研究成果

2.3.1 タングステンと異種金属材料の接合

(1) はじめに

低コストで高品位なリーフの製作技術の確立のため，最もエネルギー密度の高い溶接方法であるが，高度な技術を要する電子ビーム溶接機を用い，タングステンと安価な異種金属との接合を試みた。

金属S，T，C，Aを用い，一般的な溶接条件で突合せ接合面を溶かし込む予備試験を行った結果，Aを対象から除外した。(表2.3-1)

表 2.3-1 金属の種類と予備試験結果

	T	S	T	C	A
予備接合試験	—	○	△	×	×

(2) 電子ビーム溶接のまとめ

電子ビーム溶接を用いて接合試験をしたところ、接合できたのは S 材のみであった。そこで本テーマの異種材料の接合を S 材に絞って実施した。

2.3.2 構造 Y 細工の設計・製作

(1) はじめに

本プロジェクトでは、薄板を強固に接合するために、構造 Y 細工的な機械的組合せによる接合を行った後、溶接接合することを想定している。溶接接合を良好に行える様に、最適な機械的接合法（構造 Y 細工的接合法）について検討した。

(2) 実験方法

X 線遮へい版をタングステンと S 材による接合材料で作製することを想定している。タングステン部分で X 線を遮へいするものである。

構造 Y 細工的接合だけをした材料（溶接無し）の引っ張り強度は目標を超えており、目標に達することができた。

溶接接合する予定の箇所には、光の透過がないことを確認した。接合の密着性が高いことを示していた。

構造 Y 細工的接合した材料のタングステン側を、ナノ門型加工機を使用して加工した。

2.3.3 L 装置等による溶接技術の検討

a. 目的

高速かつ精密駆動装置に搭載したナノ制御 L 溶接機を製作設置することにより、タングステン合金と異種金属の高品位な溶接を行う。真空中で行う電子ビーム溶接と違い大気中で行うため、大幅な時間短縮によるコスト低減を図る

b. 装置概要

- ・ L 発振器
- ・ 数値制御装置（ナノ制御）

- ・制御軸数：4軸
- ・機械装置：X－Y軸モータ駆動

c. 試運転結果

S材に溶接を行い、溶接ビードが形成されるのを確認出来た。

装置の光学ヘッドから照射されるビームの特性調査や光学ヘッドの傾斜角の調査の結果、より安全で異種材料接合に適した溶接条件を割り出す事ができた。

その後もテストピースを用いた溶接実験を繰り返し、最終目標である構造Y細工接合の嵌めあいに対応でき、必要な溶接強度も満たした溶接技術を確立した。

また溶接速度の高速化や、異種材料間の溶接比率を割り出す事で、溶接技術の効率化を果たしたのみでなく、溶接時に用いるシールドガスの吹き付け方法の改善によって、溶接ビードの仕上がりも向上させる事ができた。

これらの技術を活かし、実機サイズの構造Y形状のテストピースを溶接し、すべての溶接箇所において接合が成されているのを確認できた

2.3.4 異種材料接合材の同時精密加工技術の確立

(1) はじめに

平成20年度に実施した各種切削工具による切削基礎試験結果及び平成21年度に実施したタングステン材とS材の構造Y細工接合技術の開発結果を踏まえ、切削加工作業の効率化を図るため、タングステン材とS材を構造Y組合せした接合材を同時に効率的に切削加工するための技術開発について検討した。

(2) 検討結果

適切な構造Y細工方法を見つけた結果、接合部分は強固な溶接状態が求められることになった。しかし、最終年度に入りL装置では極微量しかタングステン合金に溶け込みが入っていないことがわかり、素材状態で異種材料を溶接で接合したところを異種材料の同時切削で除去してしまうと、せっかくの接合部分をほぼ削り取ってしまうことがわかった。以上のことから、異種材料同時切削ではなく、個別に切削し完成したものを、精密に溶接することで製品に仕上げる方向で完成するように方針を変更することとした。

3. 最薄化への対応

3.1 研究目的

現在のX線遮へい板より薄いX遮へい板を開発するため、薄肉素材を精密加工する薄肉加工技術と薄肉面を鏡面にするための薄肉鏡面加工技術の開発を目指す。

3.2 研究内容

3.2.1 K 治具による高精度加工技術の開発

薄肉素材を精密加工するためには、加工対象素材を精度よく保持するための道具（薄肉素材保持治具）が必要であるので、薄肉素材保持治具（本研究課題ではK 治具と称する）の開発を行う。今年度は、K 治具における可動任意保持ピンについて試作試験を行う。

3.2.2 傾斜・回転テーブルによる効率的な高精度加工技術の開発

ナノ門型加工機にロータリーテーブルを取り付け、そのロータリーテーブルを2軸で作動できる機構へと発展させるための検討を行う。ロータリーテーブルを2軸制御することによって、ロータリーテーブル上の加工対象素材を精密加工する手法を開発する。

3.3 研究成果

3.3.1 K 治具による高精度加工技術の開発

（1）はじめに

加工の際、最薄素材を精度よく保持するための道具として薄肉素材保持治具（K 治具）の検討を進めた。K 治具は、薄素材の平面度を創成するとき使用する保持治具である。K 治具の機構は次のようである。加工する際に、まず、図 3.3-1 で示すように加工前の素材を3点の固定基準点で保持することによって、基本的な平面を決定する。次に、この平面状態を維持するため、多くの点（図 3.3-2 に示す可動任意位置保持ピン）で保持する。この手法により、素材の歪を残したそのままの状態素材を保持することができる（図 3.3-3）。

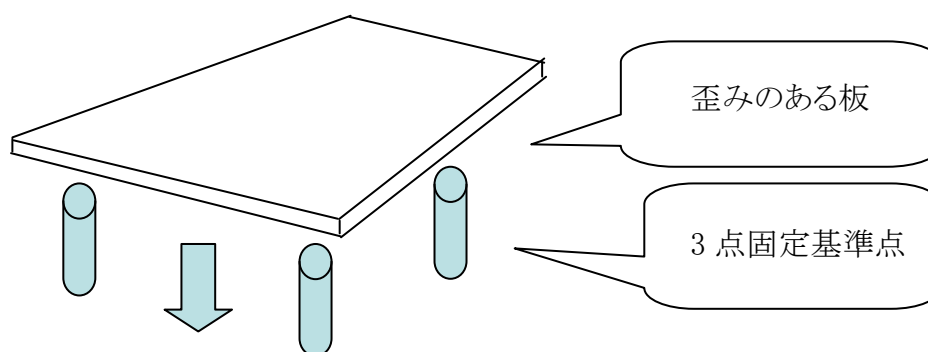


図 3.3-1 薄肉素材の平面度の創成

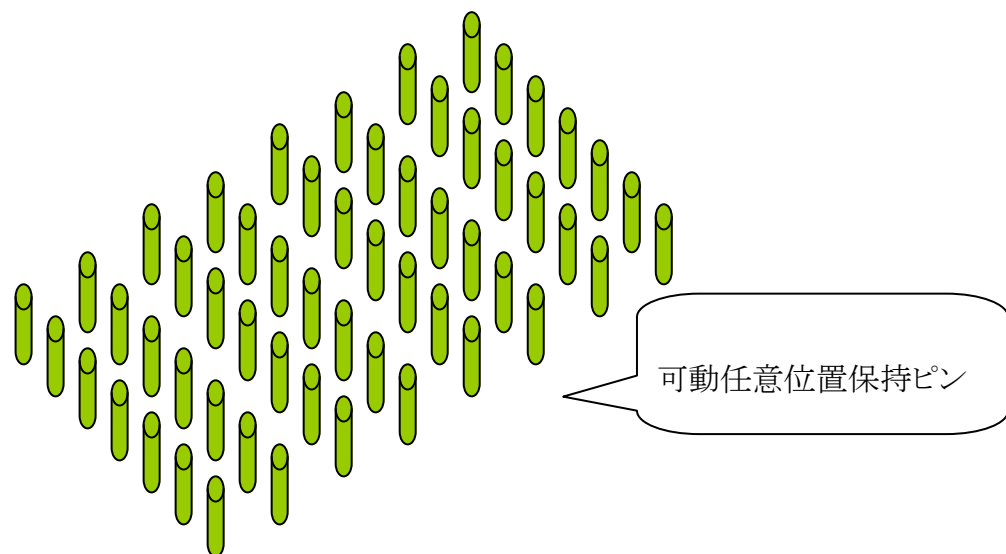


図 3.3-2 多くの点（可動任意位置保持ピン）による薄肉素材の保持方法

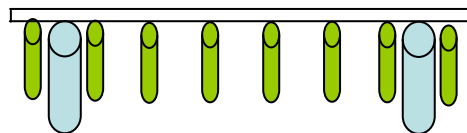
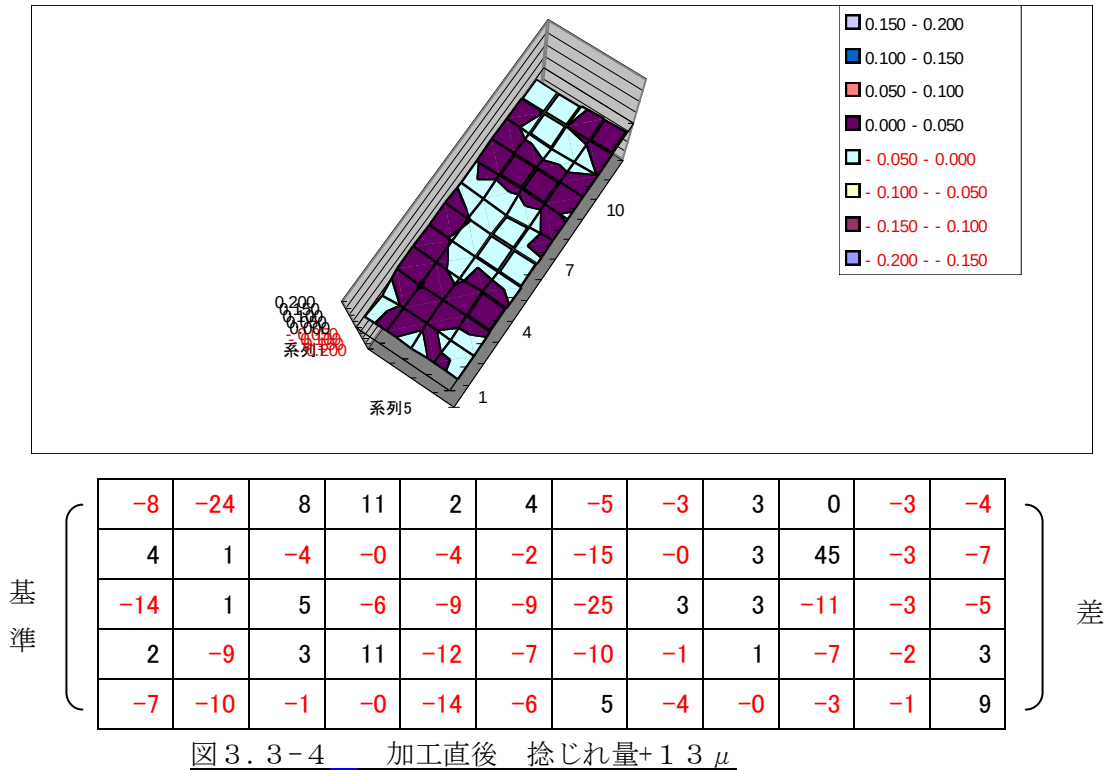


図 3.3-3 3点固定基準点と稼動任意位置保持ピンを組合せて薄肉素材を保持させた状態

（２）稼動任意位置保持ピンの考え方と使用結果

素材の保持機構は次の通りである。最初、3点の固定基準点は可動任意位置保持ピンより高い位置にあり、先ずこの3点で素材を保持する（図 3.3-1）。次に、低い位置にあった可動任意位置保持ピンの保持部分（ピン、図 3.3-2）が押し上がってきて素材を保持するようにする（図 3.3-3）。

製作した K 治具で切削した結果を図 3. 3-4 に示す。



現状品で上記のデータは総捻じれ量が+1.3 μm - (-3.2 μm) = 4.5 μm であるので、加工前から加工後までの除去深さ 300 μm に対して素直な状態であることが判る。(除去量の 1.5 % しか変形してないから。)

残念ながら、新 K 治具のスライド部分に不調が出て、使用を中止せざるを得なくなった。しかしながら、これまでの傾向から、上記の 4.5 μm は今後に期待の持てるデータと判断している。

3. 3. 2 傾斜・回転テーブルによる効率的高精度加工技術の開発

(1) はじめに

数枚の X 線遮へい板を同時に高精度で加工するため、加工対象素材を設置する加工機のテーブルを高精度で傾斜させることや回転させるための方法について調査研究を行った。調査した内容は、テーブルの傾斜や回転が同時に高精度で実現できる機能を検討することにした。基本的概念は図 3. 3-5 に示す。

- ・ テーブルの傾斜機構

放射線治療装置のマルチコリメーターには 60 枚の X 線遮へい板が使われているが、各遮へい版の遮蔽面はそれぞれ異なった角度を持っている。加工対象素材を異なる角度を持つ X 線遮へい板へと高能率で加工するためには、加工対象素材を設置するテーブルに傾斜機構を待たせることが必要である。

- ・ テーブルの高精度旋回機構

数枚の X 線遮へい板を同時加工するためにテーブルに高精度旋回機構を待たせる必要がある。高精度旋回機構は、加工開始時の平面創成をするときに使用することを想定している。

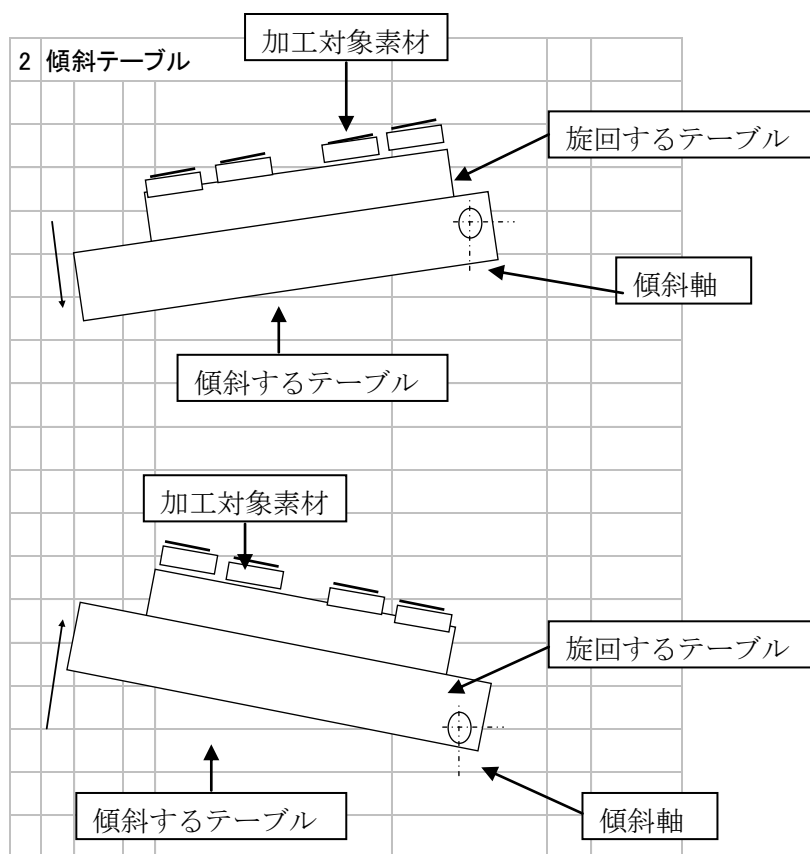


図 3.3-5 加工機のテーブルの傾斜機構と旋回機構について

(2) 別置きハンディーターミナルスタンド

既設門形ナノ加工機の操作性を損なわず、単独で傾斜・回転テーブルの制御可能とするために、〔写真 3.3-3〕の別置きハンディーターミナルスタンドを設置した。

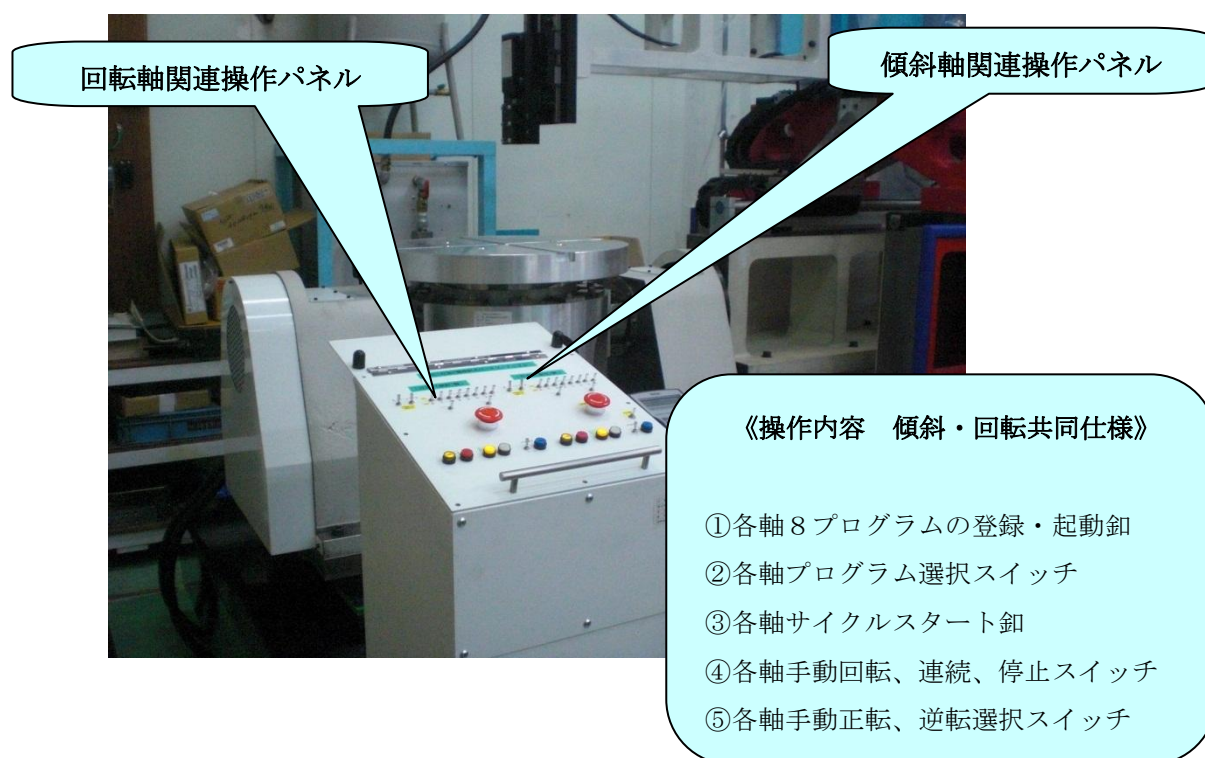


写真3.3-3 別置きハンディーターミナルスタンド

本研究開発で高効率切削加工技術を担う加工法として選定した「ヘール加工法」の特長について〔図 3.3-8〕に示す。

① 従来人手に頼っていたサブミクロン単位の表面粗さを切削加工のみで実現できる加工法

② バイト形状精度を反映した鋭角な断面形状を得ることができる加工法。

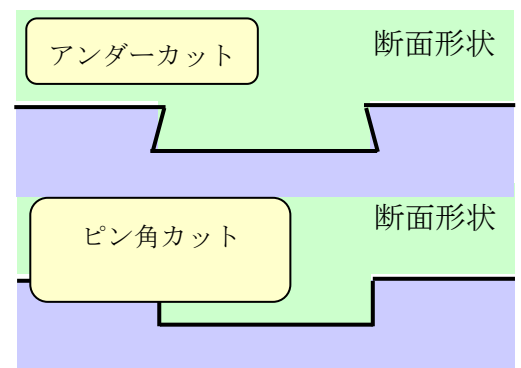


図3. 3-8 ヘール加工法の特長

今回実施した事前加工を下記に掲げた詳細項目にしたがってまとめる。

- a. 事前加工用に準備した機械および遮へい板テストピースと各種工具
- b. 加工材 1 : タングステン単体材へのヘール加工
- c. 加工材 2 : タングステナーS 材接合材へのヘール加工
- d. 加工精度 : 現状品の半分以下
- e. 加工時間 : 現実仕様タングステン単体材の 3 倍以下
- f. 既存の X 線遮へい板とのコスト比較評価

a. 事前加工用に準備した機械および遮へい板テストピースと各種工具

- a) 事前加工に使用した、NC ターニング（立形旋盤）加工機；東芝機械性 CNC ターニング：TX 1 3 の外観写真および主な仕様を〔図 3. 3-8-1〕に示す。



《立旋盤の主な仕様》

- ・テーブル直径： $\phi 1,250\text{ mm}$
- ・刃物台左右移動量： 920 mm
- ・刃物台上下移動量： 800 mm
- ・回転数： $2 \sim 450\text{ rpm}$
- ・送り速度： $2,000\text{ mm/min}$
- ・主電動機： $45/37\text{ kw}$
- ・機械高さ： $4,635\text{ mm}$
- ・設置面積： $3800 \times 4990\text{ mm}$
- ・機械重量： $17,000\text{ kg}$
- ・設備年式： 1996年6月

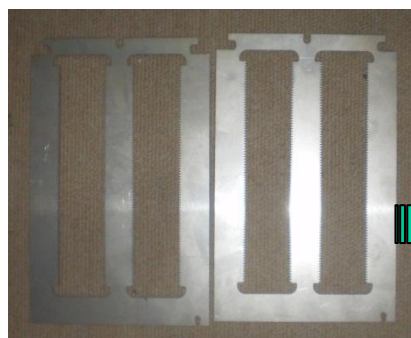
拡大

事前加工に使用した東芝機械製立旋盤：TX13



図3.3-8-1 事前加工に使用したNCターニング(立形旋盤)加工機

b) 事前加工に使用した、遮へい板テストピース：異種材接合用タングステン材およびラック加工済みS材を〔写真3.3-4〕に示す。

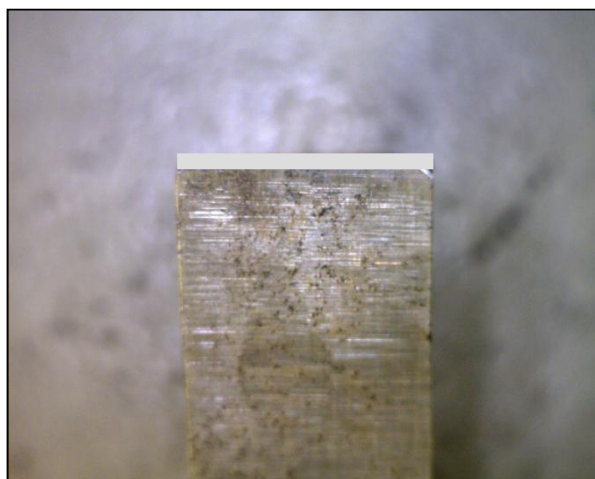


異種接合材：タングステン合金材／S材⇒セット段取り

写真3.3-4 事前加工に使用した、遮へい板テストピース

c) 事前加工に使用した、各種工具：ヘールバイト（ハイス、超硬スロアウェイ、ダイヤモンド）を〔写真 3.3-5〕に示す。

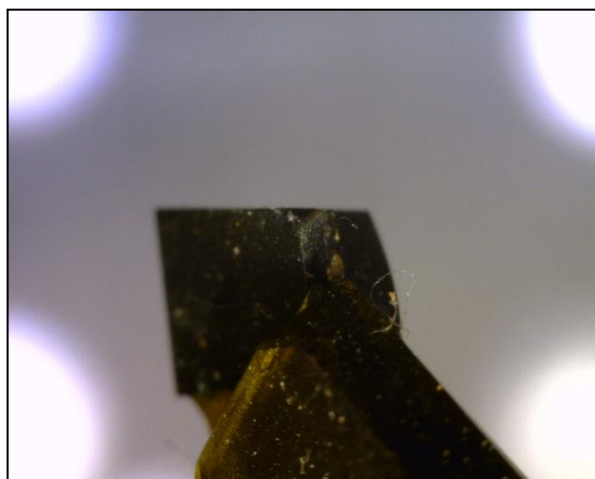
ダイヤモンドバイト及び加工諸元をフレネルレンズ加工等のヘール加工で実績のある東芝機械殿より借用、アドバイスして頂いた。



ハイス



超硬スロアウェイ



単結晶ダイヤモンド



PCD：多結晶焼結ダイヤモンド

写真 3.3-5 事前加工に使用した各種工具

- b. 加工材 1：タングステン単体材へのヘール加工および
 c. 加工材 2：タングステン-S 材接合材へのヘール加工について段取りの都合上同一の段取り治具にセットし加工実験を行った。段取りを〔写真 3.3-6〕に示す。

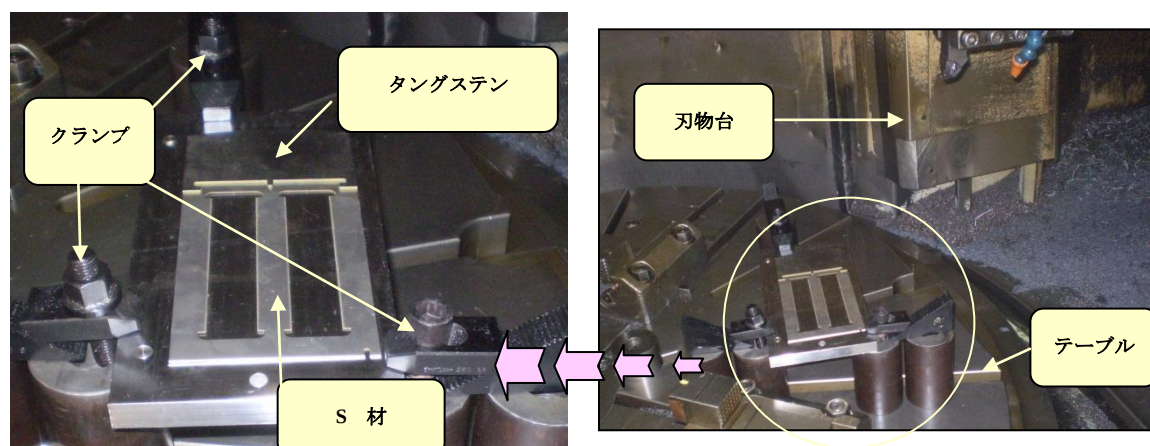


写真3.3-6 段取り治具にセットした加工実験状況

◆加工結果

〔写真 3.3-7〕に示す通り、最も切削抵抗の少ない、ハイス製のヘールバイトを使用したにも関わらず、タングステン材の固定強度不足と思われる原因により、段取り治具から激しく外れてしまった。

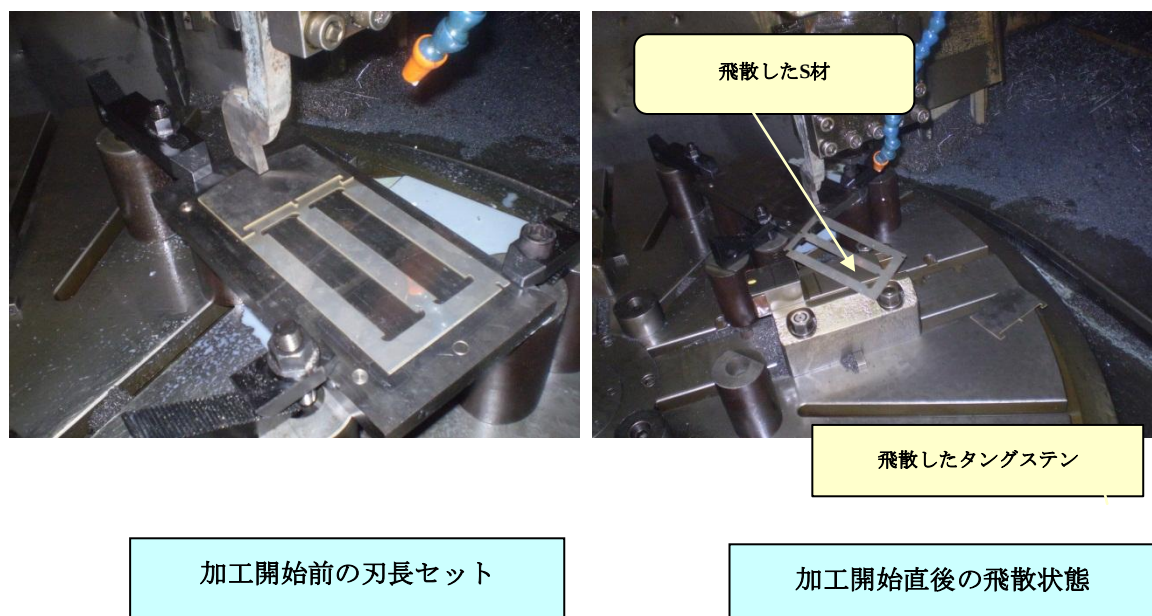


写真 3.3-7 加工試験結果(1)

◎タングステン合金部には、全く異常が見られず、S 材結合部のみが大きく変形した。[写真 3.3-8]

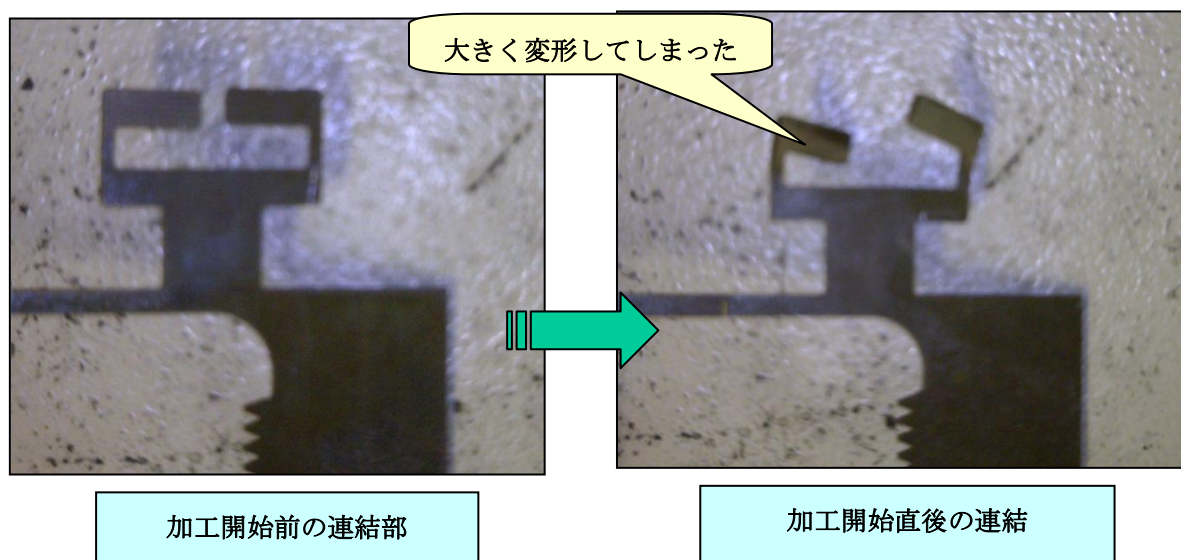


写真 3.3-8

加工試験結果(2)

◎使用したハイス製ヘールバイトは、刃先が欠けていた。[写真 3.3-9]

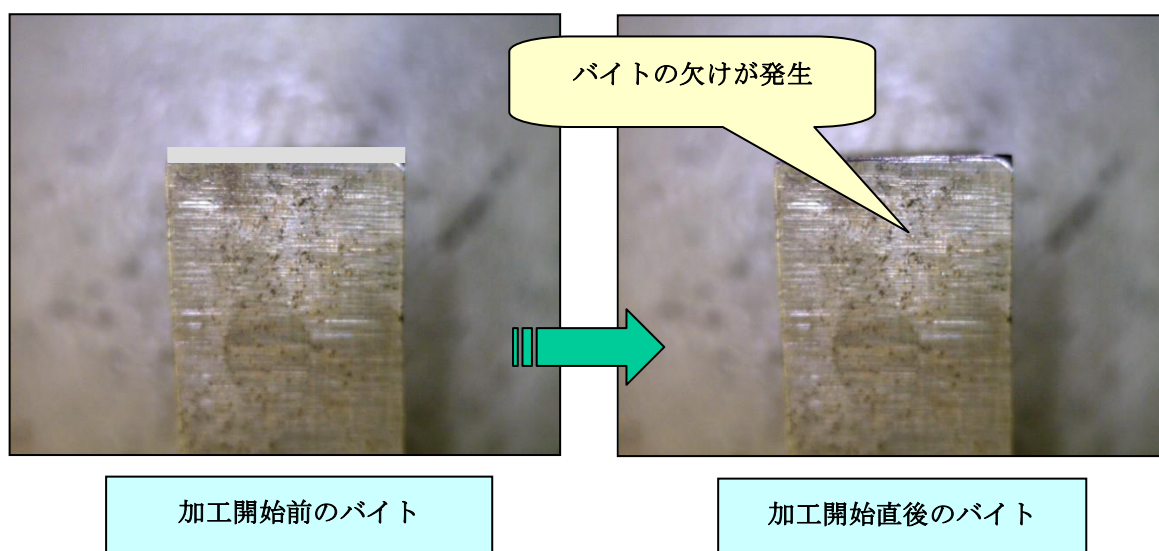


写真 3.3-9 加工試験結果(3)

◎外れたタングステンおよび S 材を再取付したが、結合部の変形が大きく再現性はなかった。その状態を〔写真 3.3-10〕に示す。

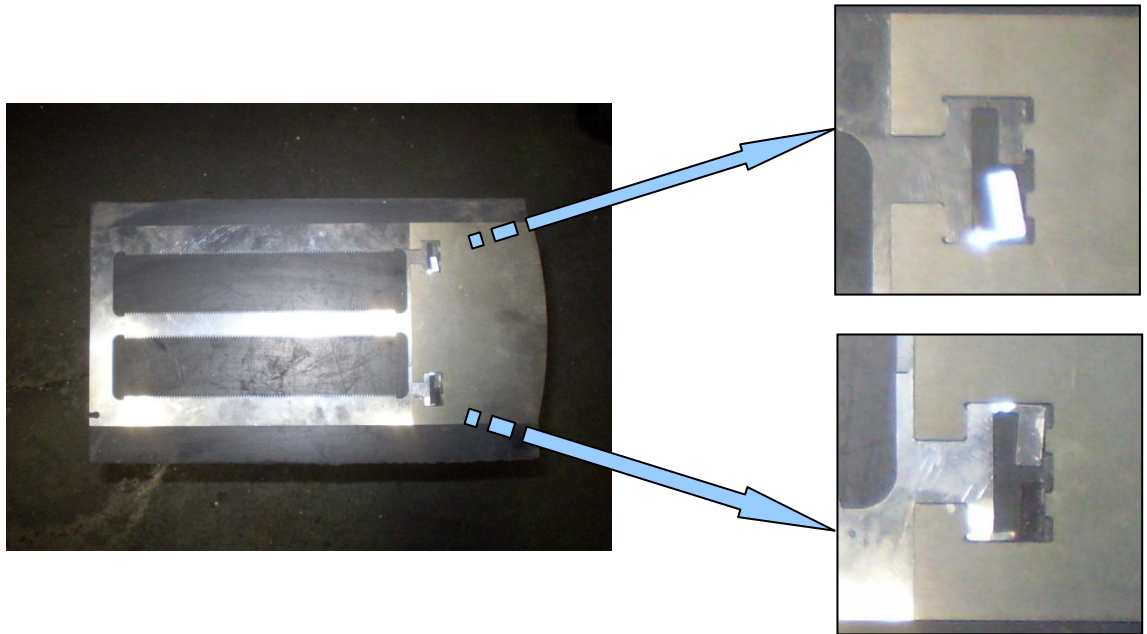


写真 3.3-10 加工試験結果(4)

以上のことから、切り込み量を 0.1 mm による粗加工を行なうことができなかったため、本来の目的である平面度修正をより迅速に行う予定の超仕上げヘール加工の達成にはいたらなかった。

K 治具の開発により、薄肉製品の保持に有効な加工手法を得ることができた。高精度な傾斜・回転テーブルの製作により薄肉加工技術の開発の基盤ができた。今後、これらの基礎技術をもとに、最薄化を達成するよう開発を進める。

4. プロジェクトの運営管理

4.1 研究開発推進会議及び事業化検討会の開催

PLと川下企業と連携を図りながら、研究開発全体の進捗状況の把握、課題の抽出・検討、研究成果の評価及び事業化計画の策定・検討を行うことにより、本プロジェクトの円滑な推進を図るため、構成機関全体による「研究開発推進会議及び事業化検討会」を次のとおり合計8回（各年度ほぼ3回）開催した。

（平成20年度）

回	開催日時	開催場所	議 題
1	平成20年12月3日 13:00～17:00	サン・ピーチ OKAYAMA	・各機関による個別実施内容説明 ・意見交換及び今後の見通し
2	平成21年3月3日 13:30～16:30	オオタ株式会社	・平成20年度事業実施状況最終報告 ・委託事業手続き概要説明他 ・連絡事項他

（平成21年度）

回	開催日時	開催場所	議 題
1	平成21年7月28日 13:30～16:30	協同組合岡山鉄工センター 福祉会館	・平成21年度研究開発計画審議 ・委託事業手続き概要説明 ・経理関係業務実施要領説明 ・連絡事項他
2	平成21年12月9日 13:30～16:30	協同組合岡山鉄工センター 福祉会館	・平成21年度事業実施状況中間報告 ・中間評価ヒアリング資料作成審議 ・平成22年度実施計画作成審議 ・連絡事項他
3	平成22年3月3日 14:00～17:00	サン・ピーチ OKAYAMA	・平成21年度事業実施状況報告 ・平成21年度成果報告書作成周知 ・平成22年度実施計画検討 ・連絡事項他

(平成22年度)

回	開催日時	開催場所	議 題
1	平成22年8月4日 14:00～17:00	協同組合岡山鉄工セ ンター 福祉会館	・平成22年度研究開発計画審議 ・研究開発全体計画説明 ・各機関による個別実施計画説明 ・委託事業手続き概要説明他
2	平成22年12月21日 14:00～17:00	協同組合岡山鉄工セ ンター 福祉会館	・平成22年度事業実施状況中間報告 ・各機関による研究開発実施状況 ・意見交換及び今後の見通し ・連絡事項他
3	平成23年3月8日 14:00～17:00	サン・ピーチ OKAYAMA	・平成22年度事業実施状況最終報告 ・各機関による研究開発最終実施状況 ・各機関による成果報告書作成案確認 ・平成23年以降の骨太方針他

4.2 取得財産

本プロジェクトで購入した取得財産（平成 20 年度、平成 21 年度、平成 22 年度）は以下のとおりである。

品名	取得年月	保管又は設置場所会社
(1) 手動真空ポンプ	2008 年 12 月	オオタ株式会社
(2) ナノ門形加工機	2009 年 3 月	オオタ株式会社
(3) 圧縮空気温調除湿装置	2009 年 2 月	オオタ株式会社
(4) ナノ制御 L 加工装置	2009 年 12 月	秋山鉄工株式会社
(5) 2 軸傾斜式ロータリテーブル	2011 年 1 月	オオタ株式会社

第3章 その他

1. 研究発表・論文投稿

予定なし。

2. 特許の状況

検討中。

3. プレス発表

特になし。

4. 参考文献

特になし。

第4章全体総括

1. 研究目的及び概要

放射線治療装置のマルチリーフコリメーターに内蔵されているX線遮へい板の部材はX線を完全に遮へいするタングステンが利用されている。しかし、タングステンは高価な難削材であるため、加工する際には長時間かけて慎重に行う必要があることや、加工に使用する工具が短時間で摩耗すること等の問題点があり、X線遮へい板の作製コストを高める原因となっている。

また、ガン患部へのX線の照射範囲を高精度に制御するためには、X線遮へい板を出来る限り薄くする必要があるが、現在の加工技術では、薄肉化技術に限界がある。

これらの問題点を解決するため、難削材（タングステン材）の切削技術高度化、X線遮へい板を異種接合材に変換するための異種材料接合化技術、薄肉化技術の3研究課題について研究開発を推進し、事業化を段階的に実施することを目指した。

以下に、各研究開発項目ごとの成果を示す。

2. 研究成果

2.1 難削材切削技術高度化への対応

難削材の切削において、工具材料と刃先形状の違う3種類の切削工具で切削加工試験を行い、切削抵抗の低い工具を候補として選定し、さらに工具摩耗を検証して最適工具を選定した。

本条件を使用して、タングステン合金のX線遮へい板を製作した。

前年度の成果から、X線遮へい板のタングステン合金内の内部応力が高い事が判明したことから、内部応力を低減する目的で、通常行われる熱処理を、タングステン合金メーカーの推奨条件で熱処理を実施し、その後、X線による残留応力の測定を行った。その結果から、その熱処理の方法で残留応力を除去することはできないことが判った。

2.2 異種材料接合、複合素材加工への対応

(1) 異種材料接合材の同時精密加工技術の確立

難削材切削技術高度化技術として、平成20年度、各種切削工具による切削基礎試験を実施し、平成21年度、さらに詳細な工具の切削抵抗試験及び寿命試験を行うことにより、最適な切削工具及び切削条件の選定を行った結果、加工時間が大幅に短縮化できることを確認した。

また、タングステン材とS材の構造Y細工接合技術については、平成20年度、接合方法の基本設計の検討および試作を行い、平成21年度、実際に試験ピース（現状厚みと最薄化の2種類）を構造Y細工接合したものについて、平面度、接合強度（引張り、曲げ強度）の確認試験を行い、構造Y細工接合に溶接を加えることで、十分な強度が得られるこ

とを確認した。

平成 22 年度は、これまでの成果を踏まえ、切削加工作業の効率化を図るため、タングステン材と S 材を構造 Y 組合せした接合材を同時に効率的に切削加工するための技術開発を行う計画であった。その計画を進めていく中で、適切な構造 Y 細工方法を見つけた結果、接合部分は強固な溶接状態が求められることになった。しかし、最終年度に入り L 装置では極微量しかタングステン合金に溶け込みが入っていないことがわかり、素材状態で異種材料を溶接で接合したところを異種材料の同時切削で除去してしまうと、せっかくの接合部分をほぼ削り取ってしまうことがわかった。以上のことから、異種材料同時切削ではなく、個別に切削し完成したものを、精密に溶接することで製品に仕上げる方向で完成するように方針を変更した。

厚実仕様のタングステン材と S 材を構造 Y 組合せ接合し実機仕様の大きさのものを製作した。目標の加工精度は未達成のため今後継続して開発を行う。また、目標の切削加工時間（実仕様のタングステン単身材と同等以下）については、推定値を含むが達成できる見通しを得た。

(2) L 装置等による溶接技術の確立

異種材料溶接技術の開発については、平成 20 年度、電子ビーム溶接技術の検証を行い、不可能とされていた安価な金属材料の中で、S 素材がタングステンと溶接可能であるとの知見を得た。平成 21 年度は、電子ビームに匹敵するエネルギー密度で溶接を高精度に行なうことが出来る最新のナノ制御 L 加工（溶接）装置を製作し、異種材料との溶接実験を実施した。その結果、電子ビーム溶接と比較して大気中で溶接出来ることから、溶接時間が大幅に短縮出来ることとなり、L 溶接技術が有利であることを確認した。

平成 22 年度は、X 線遮へい板（現状厚みと最薄化厚みの 2 種類）を用いて、溶接技術により本格的な溶接試験を実施して性能評価を行い、目標の接合強度を満足する成果を得た。従来接合できないといわれていたタングステン合金と S 材が十分な強度で接合できるようになったことは大きな進歩と考えている。

また、X 線遮へい板の表裏両面からの同時溶接技術の開発についての検討を行ったが、設備費用の点から同時溶接することは難しいと判断した。よって現実的で比較的安い装置費用で出来る片面ずつの両面溶接について調査を行い、全体の変形の戻りの状態の結果から、両面溶接する方が有利であることが分かった。

2.3 最薄化への対応

(1) K 治具による高精度加工技術の開発

開発製作したナノ門形加工機を使って X 線遮へい板を薄肉加工するためには、薄肉素材を保持する治具（本研究課題では K 治具と称する）が必要不可欠であるため、平成 20 年度、可動任意保持ピンの研究開発を行い、平成 21 年度に駆動方法などの研究開発を行っ

て、実仕様のX線遮へい板を高精度に保持できるK治具を完成した。

平成22年度は、製作したK治具を用いて実仕様遮へい板（タングステン単身材及びタングステンとS材の接合材）の切削加工試験を行った。この結果、加工後の大きな変形が厚さ2mm前後で発生し加工継続不可能と判断した。また、代替案として接着治具も製作し最薄化を目指したが、やはり2mm前後から捻じれ傾向の変形が累積し目標の加工精度を達成できないと判断した。そこで、変形の累積をキャンセルできる方法として、K治具の支えピンの面積密度を上げて製作した。

また、目標の切削加工時間（実仕様規模のタングステン単身材の3倍以下）についての検討を行った結果、目標時間内で切削加工できることを確認した。残念ながら機能上の不具合で初回の加工で中断したが、切削されたもののデータから捻じれが少なく、期待の持てる治具であることがわかった。機能上の問題点を解決し、本治具でさらに最薄化を達成するよう、さらに研究開発を進めていく予定である。

(2) 傾斜・回転テーブルによる効率的高精度加工技術の開発

多数のX線遮へい板を短時間で高性能に加工するためには、傾斜・回転テーブルの開発が必要であるため、平成20年度、基本的な概念設計を実施し、平成21年度、回転テーブルに傾斜テーブルを取り付けて、傾斜と回転の2軸同時加工機能を有する傾斜・回転テーブルの仕様検討及び基本設計を実施した。

平成22年度は、平成21年度までの検討結果を踏まえて、高性能の傾斜・回転テーブルの製作を行った。当初の計画どおり、高精度な装置を完成することが出来た。そして、製作した傾斜・回転テーブルをナノ門形加工機に設置し、実仕様遮へい板（タングステン単身材及びタングステンとS材の接合材）の切削加工試験を行い、目標の加工精度（目標の切削加工時間（実仕様タングステン単身材の3倍以下）を満足するための技術開発を行うため、事前に予備試験を行った。この結果、切削中に材料が飛んでしまい、加工継続が不可能になった。治具への取付に問題があり、再度加工方法の検証が必要となった。

さらに、以上の技術的検討の他、既存のX線遮へい板（タングステン単身品）とのコスト比較評価を実施した。溶接接合品については、推定値を含むが、材料費と加工作業費の合計で相応のコスト削減が見込める結果を得た。ただし、精度目標については未検証のため、今後、目標精度達成できるよう開発を進めて実用化を図る予定である。なお、のX線遮へい板については、製作できなかったためコスト評価が出来なかったが、溶接接合品の加工時間は、目標値を達成することが出来た。今後は、推定値の部分の形状加工を実施して完成品として、目標精度達成できるよう開発を進めて実用化を図る予定である。