

平成24年度課題解決型医療機器等開発事業
「再発がん治療のための新素材ターゲット技術を用いた
加速器型中性子捕捉療法システムの開発」

研究成果報告書（要約版）

平成25年 2月

委託者 経済産業省

委託先 株式会社CICS

目次

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	3
1-2 研究体制	4
1-3 成果概要	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口	13
第2章 本論	
・サブテーマ① 高熱伝導新素材のターゲット基板への応用開発	14
・サブテーマ② 抗ブリスタリング対策：水素貯蔵・拡散技術の応用	16
・サブテーマ③ 減速体系の開発	18
・サブテーマ④ 新素材リチウムターゲット冷却システムの開発	21
最終章 全体総括	23

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

これまで、がん治療は早期診断・早期治療が原則で近年ポジトロン CT や陽子線治療が先端医療機器として現状稼働している。しかし、いま医療現場では再発がんの治療が最大のニーズになっている。日本では3人に1人ががんに罹りその半数が再発、再発がん患者は約80万人に上り、その孤立化が問題になっている。このような現状に対し、放射線治療を既に受け再放射線治療が不可能な患者にも再照射できるのは中性子捕捉療法のみである。

これまで原子炉を使った中性子捕捉療法では1994年以降300症例以上のデータがあり、再発がんに対しても有効であることが証明された。例えば、頭頸部再発がんの5年生存率は約24%であり、4人に1人が5年以上生存できることが示された。これらが契機となり2004年以降需要が急激に増加し、原子炉には依存しない加速器による中性子捕捉療法機器の開発を推進しなくてはならないという認識が研究者に芽生えた。2010年12月、国立がん研究センターと株式会社CICSはこの課題を解決するため共同研究契約を締結、現在、加速器中性子捕捉療法（加速器BNCT）の実現に向け着手している。

2009年、サイクロトロン方式の加速器による中性子捕捉療法試作機が京都大学原子炉実験所内で試験稼働した。しかし陽子を30MeVで加速し標的となるベリリウムターゲットに照射するため得られる中性子エネルギーは最大28MeVと極めて高く、副次反応による機器の放射化、高エネルギー中性子に対する大規模な減速体系や遮蔽が必要であり、かつ治療時の患者の全身被曝の問題を払拭できず実用に向けてはなお多くの課題がある。

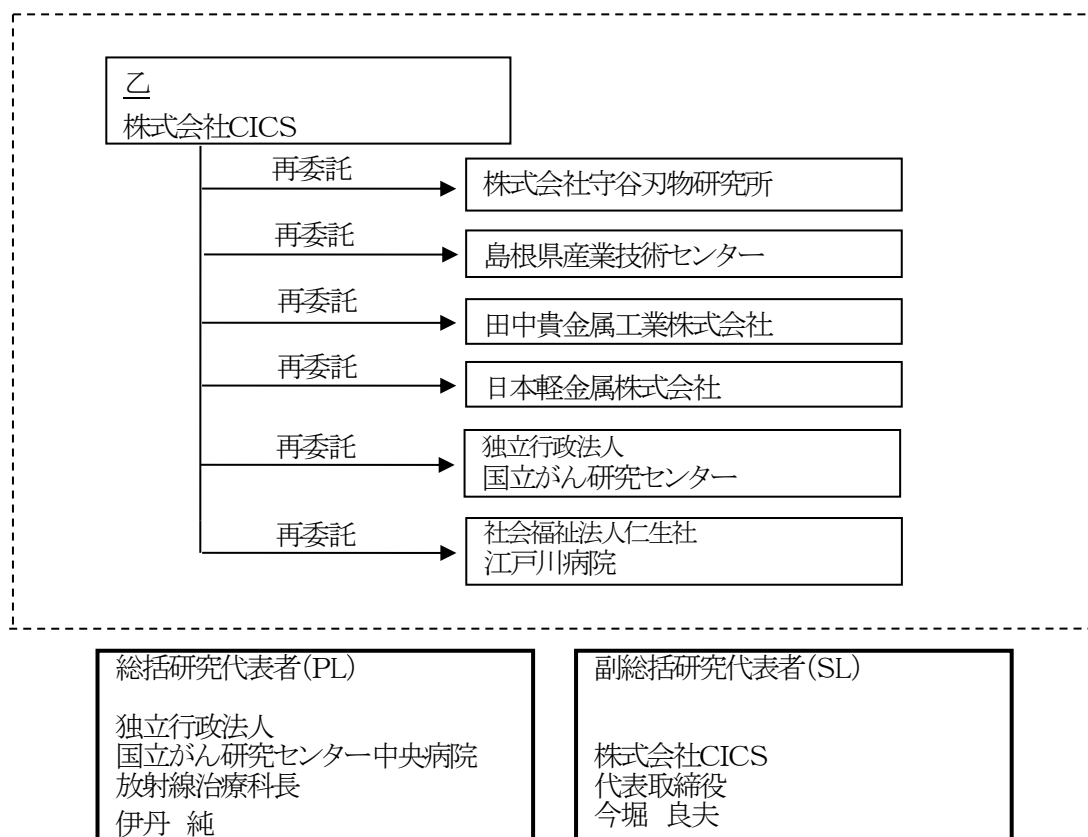
一方、CICS方式は陽子の加速エネルギーが上記の1/10以下の2.5MeVの直線型加速器を採用し、標的となる固体リチウムターゲットから得られる中性子エネルギーは最大でも0.6MeVとなり京大方式に比し約1/50と低く減速体系や遮蔽は大幅に小型化でき省エネ化に貢献できる。平成21年度～平成22年度NEDOにて研究課題「加速器BNCTコア技術となる自己再生型ターゲット装置の実用化」でこれまで開発が困難であるといわれた固体リチウムターゲットの安全性と実用性を世界で初めて証明した。本研究では次世代技術である新素材ターゲット基板の開発を目的とし、現存のCICS方式に組み込みシステム全体の放射化リスクを軽減し、患者への全身被曝が少ない安全な中性子捕捉療法機器の開発を目指す。

再発がん治療のための新素材ターゲット技術を用いた加速器型中性子捕捉療法システムの開発を目的として、平成26年度までに試作機完成と臨床実施を目標とする

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

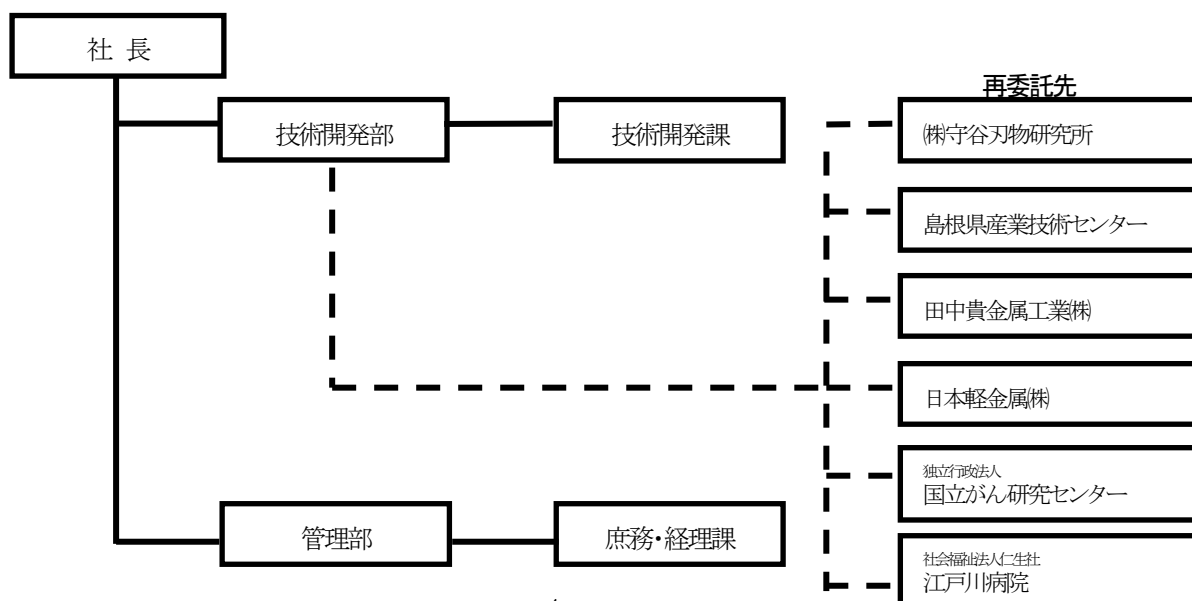
1) 研究組織 (全体)



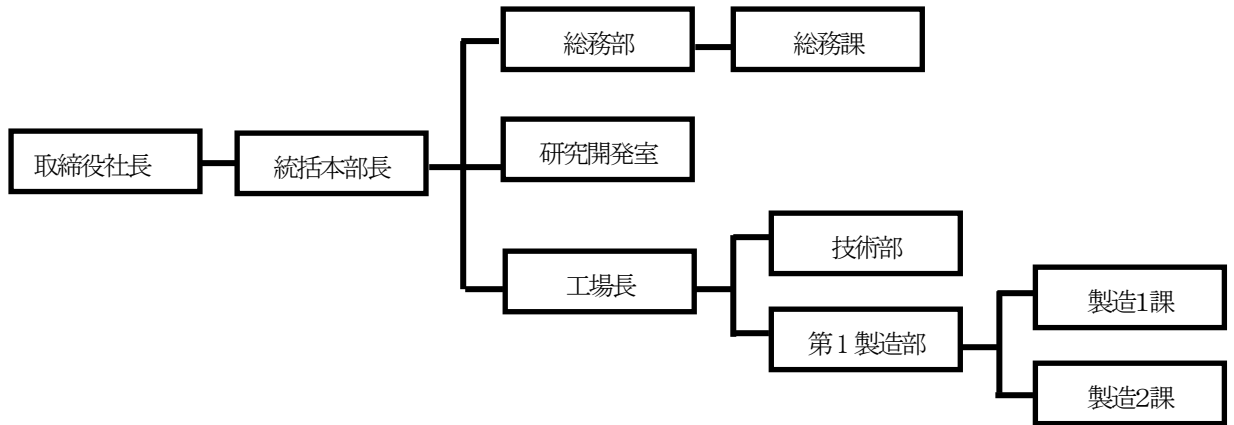
2) 管理体制

①事業管理機関

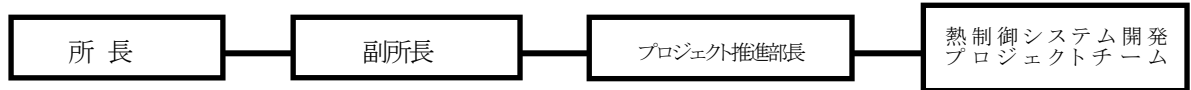
[株式会社CICS]



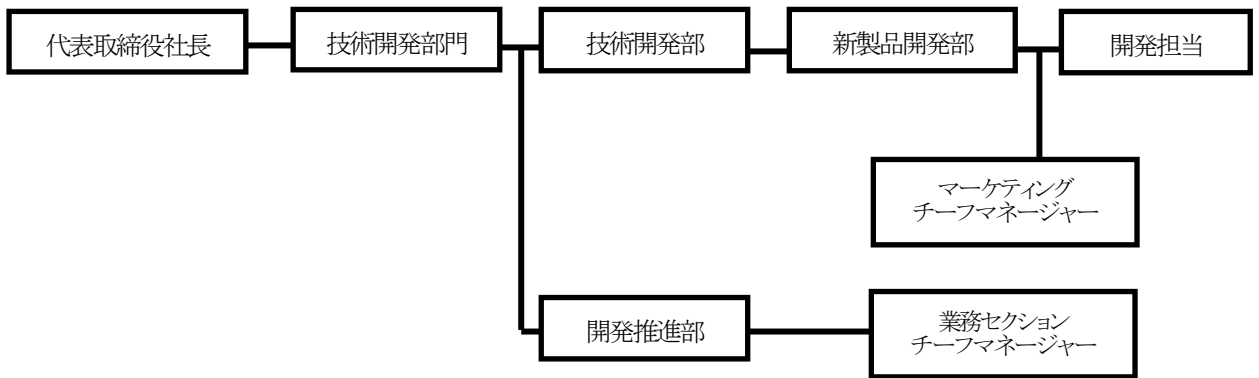
②再委託先
[守谷刃物研究所]



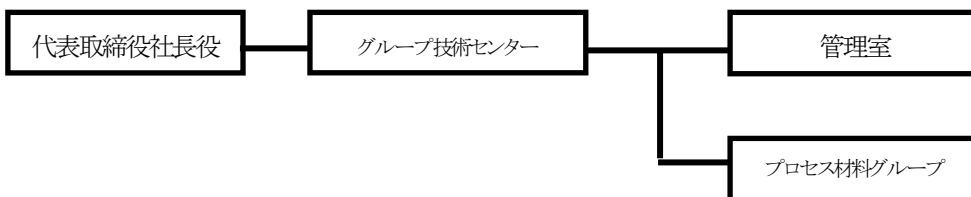
③再委託先
[島根県産業技術センター]



④再委託先
[田中貴金属工業株式会社]

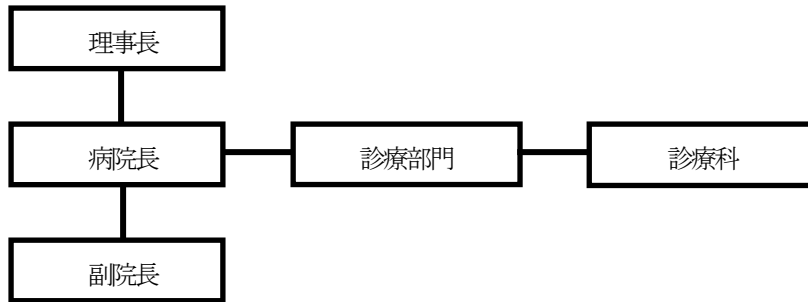


⑤再委託先
[日本軽金属株式会社]



⑥再委託先

[独立行政法人国立がん研究センター]



⑦再委託先

[社会福祉法人仁生社江戸川病院]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】株式会社CICS

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
藤井 亮	取締役	①～⑥

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
今堀 良夫	代表取締役	①、⑤、⑥
藤井 亮(再)	取締役	①～⑥
中村 勝	技術開発部 研究員	①～⑥

【再委託先】

株式会社 守谷刃物研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
石田 徹哉	研究開発室・室長	①
仲佐 太助	研究開発室・室員	①

景山 雄太	研究開発室・室員	①
内田 博之	研究開発室・室員	①
加藤 博文	技術部・部長	①
安達 剛志	製造部 製造1課・主任	①
森吉 清	製造部 製造1課・課員	①
池淵 利紀	製造部 製造1課・課員	①
松本 里司	製造部 製造2課・主任	①
佐藤 政春	製造部 製造2課・課員	①
山本 喜正	製造部 製造2課・課員	①

島根県産業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
尾添 伸明	プロジェクトマネージャー	①
小松原 聡	主任研究員	①
福田 健一	主任研究員	①
上野 敏之	主任研究員	①
吉岡 尚志	主任研究員	①

田中貴金属工業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
塩田 重雄	技術開発部門 新製品開発・嘱託社員	②

日本軽金属株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
穴見 敏也	グループ技術センタープロセス材料グループ長	③
上村 雄介	グループ技術センタープロセス材料グループ	③
小泉 慎吾	グループ技術センタープロセス材料グループ	③

独立行政法人国立がん研究センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
伊丹 純	放射線治療科・科長	⑤

社会福祉法人仁生社 江戸川病院

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
浜 幸寛	放射線科・部長	⑤

【アドバイザー】

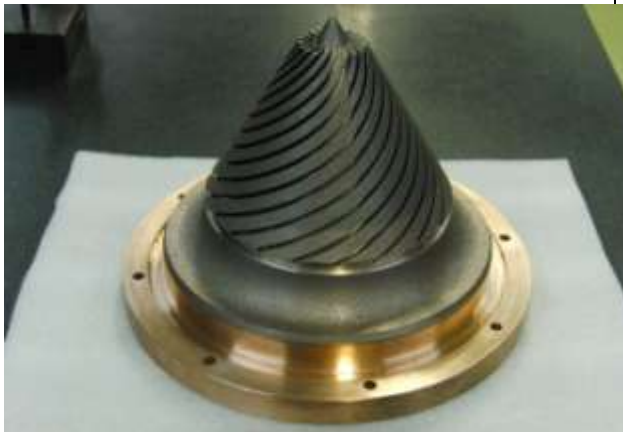
氏名	所属・役職
上田 聖	京都府立医科大学 名誉教授
加藤 逸郎	大阪大学 歯学研究科 助教

1-3 成果概要

現時点での達成状況（計画変更理由を含む）

サブテーマ1：高熱伝導新素材のターゲット
基板への応用開発

- ①新素材を用いたリチウムターゲット基板に関する熱的耐性評価、構造的強度評価をシミュレーションにより行い、銅の試作品との比較検討を行った。
 - ②上記検討を基に、銅での現設計の見直しを行い、新素材ターゲット基板として最適条件での試作を行った。
 - ③試作では、複雑な形状および素材の特性を考慮した加工技術の検討を行った。
- ※平成24年度達成目標である新素材でのリチウムターゲット基板の試作が達成できた。
達成率：100%



新素材ターゲット基板試作品

目標達成を阻害する要素の洗い出しと対応策

サブテーマ1：高熱伝導新素材のターゲット
基板への応用開発

課題：

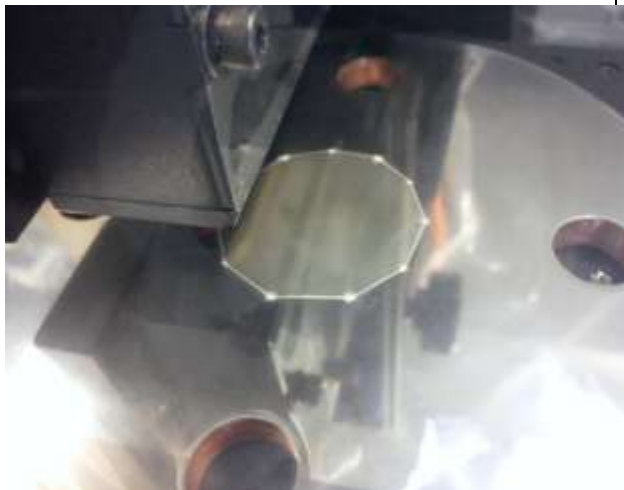
- ・新素材は熱特性（耐熱性および熱伝導性）、および低放射化素材として銅に比べ優れている。その新素材の性質として
- ①加工性の課題
 - ②機械的強度に関する課題が挙げられる。

対策：

- ①加工：新素材に適した特殊加工技術の開発およびCNC旋盤による精密加工技術との併用により、複雑な加工を達成する。
- ②機械的強度：熱解析および構造解析を行い、機械的強度評価を行う。

サブテーマ2：抗ブリスタリング対策：水素
貯蔵・拡散技術の応用

- ・大強度陽子線によるブリスタリング作用の抑制に向け、
 - ①パラジウム(Pd)はリチウムと銅とにサンドイッチされた状態で使用されるが、その状況における水素の吸蔵・放出について検討を行った。
 - ②Pd 層の合金化による効果について検討を行った。
 - ③Pd 層の厚さを、水素の吸蔵・放出およびPd 内の拡散速度から求め、且つ Phits によるPd の必要厚の評価からPd の厚みを陽子線方向に対して30 μ mとした。
 - ④Pd と Li 間の共晶反応に関する検討を行い、共晶反応が起きない条件設定を決定し、共晶反応の防止対策について検討した。
 - ⑤Pd は新素材リチウムターゲット表面に積層されるが、その積層方法について検討を行い、実用的な積層方法を確立中である。
 - ⑥銅板にパラジウムを積層し、更にリチウムを蒸着したサンプルを作成し、直接陽子線を照射して、その状態確認を行った。
- 達成率：100%



銅基板にPd 積層後リチウム蒸着試作品

サブテーマ2：抗ブリスタリング対策：水素
貯蔵・拡散技術の応用

課題：

- ①Pd は水素吸蔵・排出する性質を有するが、新素材リチウムターゲットでは、その使用法において、片面が銅に完全に覆われていて、反対側もリチウムに広く覆われる使用法であり、この状況でどれだけの水素の放出が可能であるかが課題であった。
- ②リチウムと Pd では共晶反応により合金化する性質がある。合金化によりリチウムと陽子線による中性子生成反応効率が低下する。

対策：

- ①リチウム側の表面はターゲット全体の表面積の \approx 64%であり、ターゲット表面全体をPd コーティングすることにより、水素放出表面積を増やすことができ、放出効率を上げる事が可能となる。
- ②共晶反応の起こる温度以下にターゲット温度を保つことにより、合金化を防ぐことができる。

サブテーマ3：減速体系の開発

・低エネルギー陽子線とリチウムターゲットを用いて得られた中性子をBNCTに最適な特性に導くための減速材（モデレータ）の開発を行った。

- ①モデレータの素材はフッ化マグネシウムを用い、その焼結化に関する検討を行った。
- ②焼結化に最適な条件の洗い出しを行い、徐々に試作品を大きくしていった。
- ③現在、実使用での直径の大きさ（300mm）までのフッ化マグネシウム焼結体の製作が可能となった（厚さ：30mm）。
- ④100 mm（縦）×100 mm（横）×50 mm（厚さ）の焼結体の試作品の作製を行い、モデレータとしての評価試験を行った。
- ④製品に近い形での試作品については、300 mm×30 mmのものが一組10枚必要で、予定では二組製作予定であった。
しかし、大口径および厚みが増すことにより均一性を得るために、焼結する際の温度制御に多くの時間を必要とするため、全枚数の製作を行うまでには至らなかった。
（技術的にはクリアしているが、製作時間の不足による）。

達成率：80%



フッ化マグネシウム焼結体試作品
(100mm×100mm×50mm)

サブテーマ3：減速体系の開発

課題：

- ①焼結体は非常に割れやすく、大型の焼結体の製作が非常に難しい。
- ②加工性に乏しく、特殊な形状には不向き。

対策：

- ①焼結体の大きさを徐々に上げて、条件の最適化を行いながら開発を進めた。
- ②加工法に関して現在検討中。

サブテーマ 4：新素材リチウムターゲット冷却システムの開発

- ・リチウムターゲットには 50 kW もの熱負荷がかかるため、効率的な除熱対策が必要であり、そのためのターゲット冷却システムの施策を行った。
- ①20mA の陽子線がリチウムターゲットに照射された際の熱解析を行い、除熱に必要な冷却水システムの条件を 250m/min、圧力 1.5MPa とした。
- ②冷却水の出入り口 8 ポート全てを単独コントロール（手動）可能なシステムとした。
- ③圧力、流量、温度は常にモニタを行い、次年度の自動制御に備えたシステムとした。
- ④一時冷却（ターゲット側）の熱負荷を二次冷却チラーで効率よく除熱できるシステムとした。



ターゲット冷却システム：一次冷却制御装置本体

- ・本ターゲット冷却システムを持った試運転では、最大流速：270 L/min、1.5MPa の性能を有していた。
 - ・銅製のターゲット試作機を接続し、負荷試験を行った結果、240 L/min、1.12MPa の条件で冷却が可能であり、更に余力を残していた。
 - ・本システムの自動制御化については、ソフトウェアの開発を行った。
- ※次年度にハードウェアとソフトウェアの統合化を図り、自動制御化を行う。
達成率：100%

サブテーマ 4：新素材リチウムターゲット冷却システムの開発

課題：

- ①熱負荷として 50 kW のシーズヒータを冷却水配管系に導入した実験系では問題なく制御できた。
しかし、冷却水の接する発熱体の面積により冷却効率が変わってくる

対策：

- ①実際に即した条件での更なる評価が必要。

1－4 当該研究開発の連絡窓口

- ・所属 株式会社C I C S
- ・氏名 藤井 亮
- ・電話 03-3529-6301
- ・FAX 03-3529-6303
- ・email fujii@cics.jp

第2章 本論一（1）

サブテーマ① 高熱伝導新素材のターゲット基板への応用開発

- ・研究開発担当事業者：
株式会社守谷刃物研究所
島根県産業技術センター
株式会社CICS

【目的】

加速器を用いた BNCT 用中性子源としてリチウムと陽子との核反応による生成法があり、低エネルギーの中性子を効率よく生成することができる。この方式の課題として、

- ①加速器を用いる方式では陽子線の照射による発熱量が大きく、その除熱対策が重要。
- ②ターゲット基板に銅を用いる事により、生成された熱中性子との反応で銅が放射化される。

等が挙げられる。

株式会社守谷刃物研究所および島根県産業技術センターは銅よりも熱伝導率の優れた素材を有しており、銅の成分も少なく放射化が軽減化されるため、上記の課題を克服することができる。

株式会社守谷刃物研究所は、島根県産業技術センターとの共同開発により、銅よりも熱伝導率の高いグラファイトをベースとした新素材の開発に成功している。この特殊な複合材料である新素材をリチウムターゲットの基板へ応用することにより、熱負荷に対する軽減化が図れるだけでなく、中性子による放射化を抑制することができる。

平成 24 年度はこの高熱伝導新素材のターゲット基板への応用検討を行い、新素材ターゲット基板の試作を行なう。

【検討内容】

1. ターゲット基板の流体解析・構造解析

プロトタイプのリチウムターゲット基板は材質に銅を用い、コーン型の形状をしている。このターゲットには大電流の陽子線照射による 50kW の熱量が加えられ、且つその熱量の除熱には 250L/min の冷却水で行う必要がある(サブテーマ 4 参照)。

この流速でターゲット基板を冷却した場合、どの部分にどの程度の応力が加えられるのか ANSYS Fluent を用いた解析を行った。また、流体解析からえられた圧力分布から ANSYS Structure を用いて構造解析を行った。

2. 新素材を用いたターゲット基板の試作

流体解析・構造解析の結果を基に、強度を考慮したモデル及び熱伝導率効率を考慮したモデルの試作を行った。また、新素材ターゲット基板を用い、120L/min での耐性試験を行った。

【成果】

1. ターゲット基板の流体解析・構造解析

1-1 流体解析

全体としては 1.1MPaの圧力損失が認められた。特に溝入り口およびコーン先端で大きな圧力損失が認められた。

1-2 構造解析

流体解析により得られた圧力分布データを結果を構造解析用モデルの流体接触部にマッピングを行い、解析を実施した結果、全変形量として $\approx 0.005\text{mm}$ ($5\ \mu\text{m}$)であった。この時、溝入り口付近の圧力により内側に応力が発生し、この箇所が内側の最大主応力が働き、その値は 20MPa 以上であった。

また、外側に対する最大応力は溝開始位置から一定量のところで最大となり、その値は 14 MPa で、その位置はターゲット基板外側底部頂点から 70.9mmの位置であった。

2. 新素材を用いたターゲット基板の試作および圧力テスト

2-1: 試作

構造解析の結果を踏まえ、種類のタイプの新素材リチウムターゲット基板の試作を行った。

タイプA:銅-CM-CH

真ん中にSTC-CMを配置することにより、外側に働く応力発生帯に対し強度を持たせたタイプ。陽子線により照射される部分は STC-CTを配置させることにより、高熱伝導率を確保している。

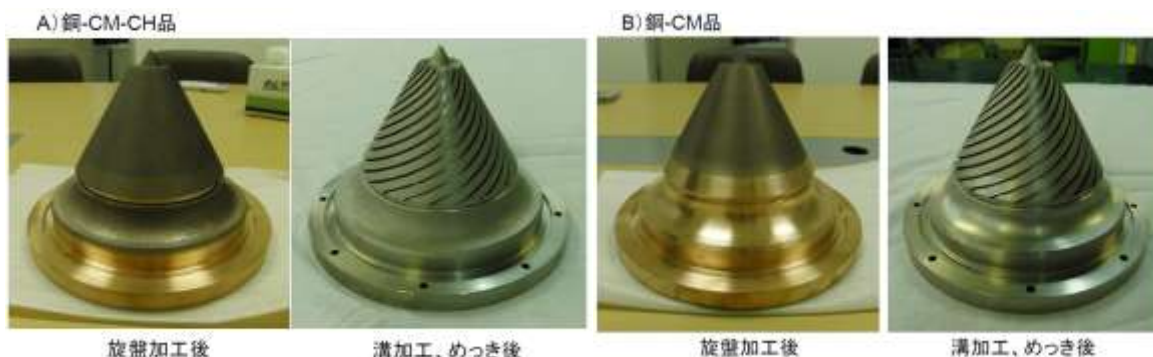
タイプB:銅-CM

陽子線により照射される部分は STC-CM を配置させ、そのほかは銅により試作。これにより、応力発生部位は銅により強度が確保され、発熱部についても STC-CM を用いる事により、強度を確保している。

これら試作品についてニッケルによる表面処理を行うことで、表面強度を上げるとともに、パラジウムコーティングの前処理としての効果も有する。

2-2: 圧力テスト

タイプAについて、流水による耐圧試験を行った。ポンプの性能上 120L/min 以上での試験はできなかったが、120L/min での試験では問題なく耐圧試験をクリアすることができた。



【考察】

平成 24 年度に計画していた新素材によるリチウムターゲットの試作まで完成することができ

た。

溝構造入り口の圧力及び落ち側への応力は相当なものであり、今後の実使用状態での耐圧試験結果が待たれる。

次年度では、本試作品の耐圧試験を重点的に行い、且つこのコーン型でのパラジウムおよびリチウムコーティングについて(株)田中貴金属工業および(株)CICSとの共同試験を行う。

サブテーマ② 抗ブリストリング対策:水素貯蔵・拡散技術の応用

・研究開発担当事業者: 田中貴金属工業株式会社
株式会社CICS

【目的】

金属中に陽子線を照射すると、金属内部で水素原子が水素ガスに変換され、金属に対して機械的ダメージを与える(ブリストリング現象)。このブリストリングを防止するには金属内部に水素ガスが溜まらないように逃がすことが重要である。その性質を持つ金属としてパラジウム(Pd)等が挙げられる。Pdは水素ガス透過膜として用いられており、水素ガスの吸蔵・放出特性に優れている。この性質を利用して新素材リチウムターゲットのブリストリングを防止する

田中貴金属工業株式会社は、Pdを含め水素拡散係数の高い金属等に関する高度な技術を有している。本技術を利用し、ブリストリング防止用金属およびそのターゲット基板への表面処理法について開発研究を行う。株式会社CICSはPHITSを用いてシミュレーション解析を行い、治療に有効な中性子のエネルギースペクトルと強度を得た上でブリストリングを防止できる水素拡散素材の厚みを決定する。

【検討内容】

1. 端部のみ露出した構造における水素の吸蔵・放出試験
リチウムターゲットの構成は銅の基板にパラジウムがコーティングされ、その上にリチウムが蒸着される。従って、パラジウムの両面は銅とリチウムに挟まれており、水素の放出される面はリチウムが蒸着されていない部分のみからとなる。
そこで、このような状況での水素の吸蔵・放出特性について実験を行う。
2. Pdの合金化に関する検討(材質)
1.における水素吸蔵・放出サイクルによる吸蔵量および放出量、形状変化等をし、合金化の必要性を確認する。
3. Pd層の必要量(構造)
ブリストリングで発生する水素量を試算し、水素吸蔵・放出量およびPd内水素拡散速度から必要なPd層の厚さを試算する。
4. Pd/Li間の反応(共晶反応)防止(構造)
Li/Pd/Cuターゲットを作成し、照射試験を行いソリッド層の必要性を確認する。同時にソリッド層候補材料の探索を行う。
Pd/Li、Cu/Li、Fe/Liにおける界面反応を確認する。
5. (複合プロセス)Pd/STCの積層手法の検討
新素材:STCを用いてPdとの種々の複合化方法について検討する。

6. ターゲットサンプルの試作

上記検討で得られた結果を元にターゲットサンプルを作成する。

【成 果】

1. 端部のみ露出した構造における水素の吸蔵・放出試験

粉末状の Pd, Pd バルクおよび Cu/Pd/Cu の積層について水素の吸蔵及び放出試験を行ったところ、粉末の Pd が最も吸蔵及び放出量が多く、三層構造が最も少なかった。粉末は表面積が最も大きく、そのために水素の吸蔵・放出量が多い結果となり、反面三層構造では表面積が最も小さいため吸蔵及び放出の速度が最も小さい値となった。

2. Pd の合金化に関する検討(材質)

Pd 単体と、Pd/Ag 合金により、水素の吸蔵・放出を 10 回繰り返し、その吸蔵・放出の検討結果から、Pd 単体のほうが水素吸蔵量も多く、且つ回数を重ねても安定した水素吸蔵量であった。水素の吸蔵・放出の 10 回連続繰り返し試験では、同径側の Pd と Cu の間に剥離がみられた。

水素の吸蔵・放出の繰り返し試験を Pd の厚みを $100\ \mu\text{m}$ および $20\ \mu\text{m}$ に変えて行った結果、どちらも Pd と Cu 間の剥がれは認められなかった。この結果から、Pd の厚みを薄くすることによって、繰り返し使用による剥離が抑えられることが分かった。

3. Pd 層の必要量(構造)

陽子線の照射条件から Pd の必要量を評価した。1時間に Pd に吸収される水素重量は $5.62 \times 10^{-4}\text{g/h}$ で、ターゲットの Pd 層を $20\ \mu\text{m}$ とした場合の Pd 重量は 3.86g に対し約 0.015%となることから、Pd の水素溶解限度である 0.04%と比べてかなり低く、水素吸蔵・放出実験からも Pd 層が十分機能すると考えられた。

4. Pd/Li間の反応(共晶反応)防止(構造)

Pd と Li の 2 元系合金は 145°C で共晶反応を示す。実際に Pd/Li の積層板を 140°C で 1 時間半および 5 時間について熱処理後に断面を観測した。その結果、明らかに Pd と Li の境界に合金層が形成されていた。合金化は中性子の生成効率を低下させるため防止対策を検討した。候補となる材料について試験を行った結果、その有効性が示された。

5. (複合プロセス)Pd/STC の積層手法の検討

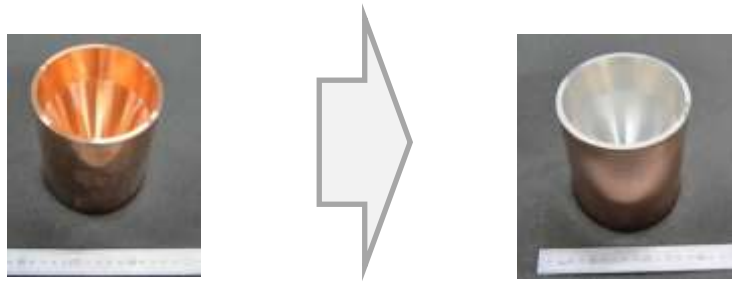
接合温度を 600°C ~ 1000°C の間で、STC/Pd および STC-Ni/Pd の 2 種類について検討した。その結果、単体の STC と Pd の複合化よりも STC-Ni と Pd の複合体形成のほうが明らかに強度が得られた。また、ばらつきはあるものの、 800°C での複合条件が最も強度が得られた。

STC-Ni/Pd 接合体での水素吸蔵・放出繰り返し試験では、その吸蔵量は Cu/Pd と同様な結果が得られている。繰り返しによる接合部に対する影響については、今回の検討では Ni-STC/Pd20 のみが接合状態が保たれていたが、Ni-STC/Pd100 は接合部が剥がれた。

6. ターゲットサンプルの試作

Ni-STC/Pd ターゲットの試作予備実験として、Cu 製の疑似ターゲットを作成し円錐内面に 20

μ mPd メッキを行った。Pd の膜厚に関しては今後の検討項目である。



サブテーマ③ 減速体系の開発

・研究開発担当事業者: 日本軽金属株式会社
株式会社CICS

【目的】

リチウムに陽子線を照射することによって中性子は生成されるが、そのままでは BNCT に使用出来ない。BNCT で用いられる中性子は、そのエネルギーが 10keV 以下の熱外中性子が原子炉 BNCT で広く用いられて来ている。従って、これまでの原子炉を用いた BNCT の多くの臨床データは 10keV 以下の熱外中性子を用いて得られたデータである。

生成された中性子はモデレータ(減速材)を通して必要なエネルギーまで落とす必要がある。中性子などの粒子が物質内を通る際の状態をシミュレーションすることができる粒子輸送計算コード「PHITS」によりモデレータに最適な素材の選定と条件設定が可能である。この素材の選定を行い、且つ高密度での製作技術が要求される。

日本軽金属株式会社は、特殊材の加工及び焼結に関する高度な技術を有しており、モデレータの素材から製作法の検討、品質分析も含め、最適化モデレータの試作を目的とする。株式会社 CICS は PHITS により最適な素材の検討を行う。また、放射線医学総合研究所の低線量影響実験棟においてモデレータに中性子線を照射し、減速後の中性子のエネルギースペクトルや強度などの特性を計測し、PHITS によるシミュレーション解析との整合性を確認する。

【検討内容】

1. モデレータ原材料:フッ化マグネシウムの原料特性評価検討
フッ化マグネシウムの焼結体を好条件で形成するために必要な原料の段階での特性について評価検討を行った。
2. フッ化マグネシウム焼結体生成に最適な条件設定の確立
焼結体は、その大きさによって焼結条件が異なるため、段階を追って焼結体の生成条件を見出し、且つ再現性を確かめながら、最終的に直径 350mm×厚さ 30 mmのフッ化マグネシウム焼結体を完成させる。
3. 焼結体の機械加工技術の検討
フッ化マグネシウムは硬く脆い材質であり、一般的な機械加工では難しいため、その加工技術について検討を行う

4. フッ化マグネシウム焼結体(100mm×100mm×50mm)による中性子測定試験
リチウムをターゲットとする中性子源を用いてフッ化マグネシウムを通じた中性子を計測し、PHITS での評価データとの整合性を検討する。

【成 果】

1. モデレータ原材料:フッ化マグネシウムの原料特性評価検討

1-1: 走査型電子顕微鏡(SEM)による粒子観測

フッ化マグネシウムの原料は A 社～D 社の4社の製品について検討を行った。
結果、SEM での観測では A 社～D 社で大きな違いは認められなかった。

1-2: 粒度分析

A 社～D 社の 4 社のフッ化マグネシウムの製品について粒度測定を行った。結果、A 社、B 社製材料では粒子径 100 μ 以上の存在比率が多く、焼結時の体積内における特性のばらつきが考えられるが、粒度だけでは実際の焼結性の評価は出来ないので実際の小型焼結実験で確認することとした。A 社製粉末では、粒度のピークが 2 山分布になっており、これは充填性に優れることが予測されるため、充填性を考慮すると、A 社材料が焼結性にすぐれることも考えられた。

1-3: 蛍光X線分析

A 社～D 社の 4 社のフッ化マグネシウムの製品について蛍光X線分析を行った。
結果、各社のフッ化マグネシウムの組成に関し、大きな違いは認められなかった。
フッ化マグネシウムの原料について上記3項目の試験を行い比較検討したが、特別大きな違いが認められなかった。

2. フッ化マグネシウム焼結体生成に最適な条件設定の確立

フッ化マグネシウム焼結体を再現性のある条件設定を行いながら、目標とする Φ 350mm まで徐々に焼結技術の確立を行った。

< ϕ 350×30t 焼結体>

【焼結体外観】 全体的に白色、割れ等の損傷無し

【実寸値】 厚さ：(任意 4 カ所) 31.28, 31.59, 31.36, 31.12
(平均 31.34mm)

直径：**348mm**


質量：約 10kg

【焼結条件】 加圧 20Mpa

【計算密度】 3.053g/cm³ ⇒約 97%



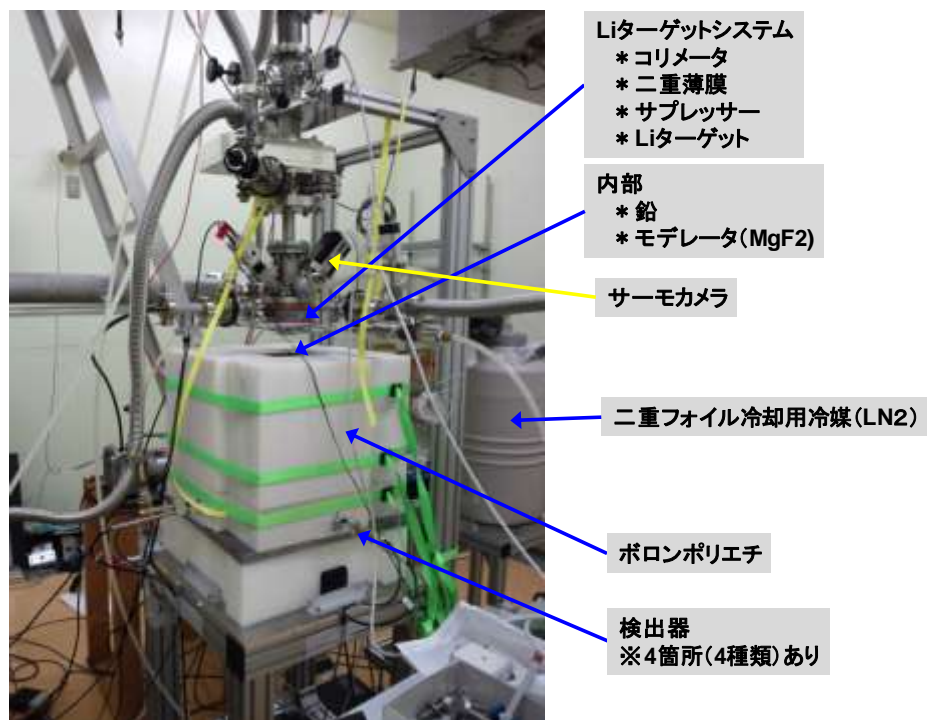
3. 焼結体の機械加工技術の検討

<p>3.機械加工法</p> <p>焼結体の表面を機械加工</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ダイヤモンドカッター ・旋盤、フライス盤 ・湿式砥石研磨 <p>3-1. 旋盤による表面切削</p> <ul style="list-style-type: none"> ・超硬バイト、回転数300rpmで切削した ⇒表面粗さ Ra 5.125μm→Ra 1.125μm/バイト摩耗し使用不可 <p style="text-align: center;">↓</p> <ul style="list-style-type: none"> ・超硬バイト材質変更 ⇒表面粗さ 上記結果と同等 バイト摩耗せず 	<p>3-2. 湿式砥石研磨による表面研削</p> <p>砥石 SW-36-H-8-V3使用 テーブル回転72.5rpm 送り速度0.66m/min 切込量0.4mm 切り込み量0.4mm ⇒表面粗さ Ra 5.174μm→Ra 0.0486μm</p> 
--	---

フッ化マグネシウム加工法:湿式砥石研磨による表面研削方法

4. フッ化マグネシウム焼結体(100mm×100mm×50mm)による中性子測定試験

フッ化マグネシウムの中性子減速材としての特性試験を行った。陽子線加速器のビームポート端にリチウムターゲットを装着し、中性子源とした。その下側には鉛及びホウ素-ポリエチレンによる中性子遮蔽体と γ 遮蔽体として5cmの鉛で中心部を囲い、その中にフッ化マグネシウム焼結体を入れて、その下部に4種類の放射線測定用チャンバーを設置しデータを得た。今後、検出器それぞれを校正し、得られたデータを線量値に変換して、PHITSでの評価データとの整合性を見る。



フッ化マグネシウム特性試験

サブテーマ④ 新素材リチウムターゲット冷却システムの開発

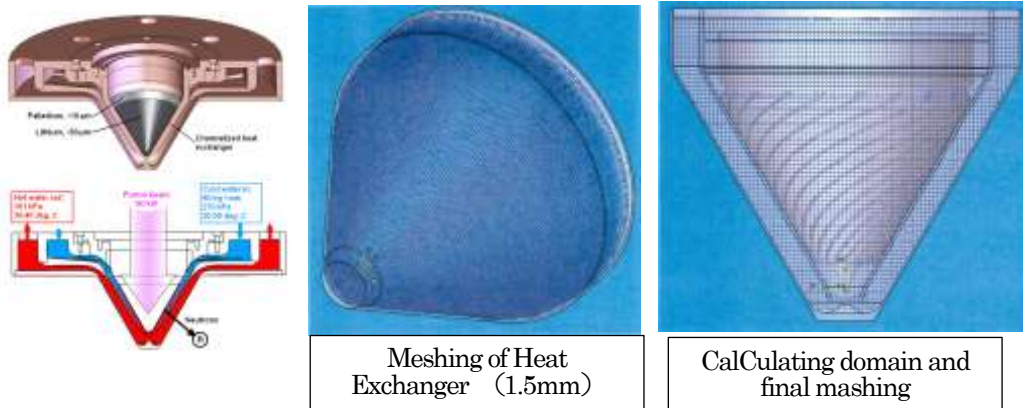
・研究開発担当事業者: 株式会社CICS

新素材ターゲットにおいて最も効率の良い中性子発生及びターゲット基板の冷却性やターゲットに占める冷却水の体積割合などを設計条件としてシミュレーション解析や理論計算などの基礎評価を行い、その構造に適した各流路における冷却水の流速や圧力及び流量分布などを検討してターゲット冷却効率の良い条件を決定する。また、ターゲットやモデレータも含めた全体の遮蔽評価及び線量評価を行いながら照射環境の設計を行う。

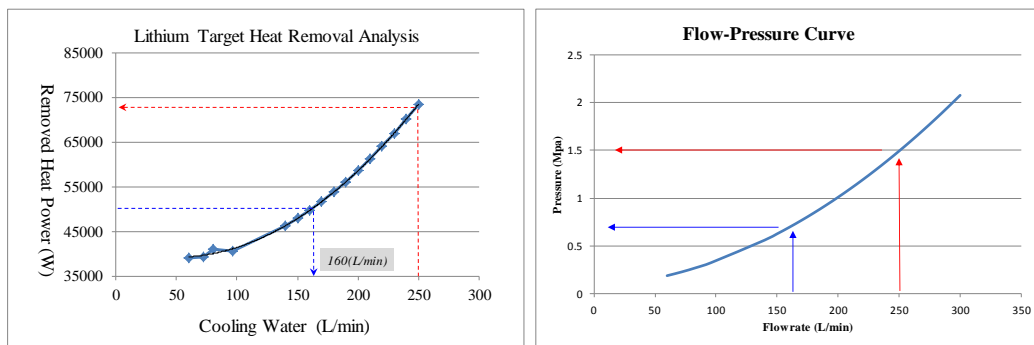
リチウムターゲットの形状はコーン型をしており、裏面には 5mm の冷却水路がスパイラス状に 20 本刻まれている。50kW の発熱量に対する冷却条件を COSMOS FLoWorks を用いて計算評価を行った。その結果、今回の計算評価では 140L/min までの評価に留まってしまい、この流量では 50kW の熱量を除去するには不十分であることが分かった。

この結果を外挿することで、50kW の熱量を除熱可能な冷却水量を求めた。これにより 50kW の熱量を除去するのに必要な冷却水は約 160L/min であった。同様にその冷却水の必要圧力は 0.7MPa であった。

ターゲットの冷却システムの能力として、50kW 時の冷却能力に対し \pm 50%アップの性能を持たせ流速を 250L/min とした。また、その流速で冷却水を流すために必要な圧力を求めると、1.5MPa の圧力が必要となる。



リチウムターゲットの構造と伝熱解析モデリング



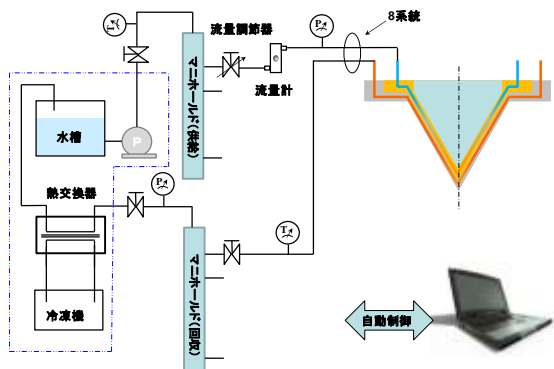
(A): 必要冷却水流量

(B): 必要圧力

50kW ターゲットの除熱に必要な冷却能力

リチウムターゲット冷却システム構成図を下に示す。リチウムターゲットは中性子を生成するため、その冷却水は微量ながら放射化される。従って、ターゲットを直接冷却するチラー（一次側チラーとその冷却水を熱交換により冷却するチラーにより構成される。更にターゲットを効率よく冷却するために 8 系統の冷却水の単独制御が可能な冷却ユニットから構成される。

本ターゲット冷却装置を用いた性能試験では、無負荷状態で最大流量が 300L/min 以上可能であった。また、リチウムターゲット（プロト機）を接続しての負荷試験では、250L/min、圧力：1.2MPa での性能を有していることが実証できた。



リチウムターゲット冷却システム構成図



(A) : 二次冷却チラー



(B) : 一次冷却チラー



(C) : ターゲット冷却ユニット

【研究開発成果及び次年度の対策】

新素材を用いたリチウムターゲット基板の開発およびその最適化のための周辺技術の開発に関して平成24年度の実績は期間が極めて短いものの、達成率が高い結果となったといえる。今年度は個々のサブテーマにおける技術開発が主目的であったが、サブテーマそれぞれの目標達成率はほぼ100%であった。(第2章参照)

次年度、平成25年度は今年度に開発された試作品または技術の目的仕様に合わせての性能試験・改良、また個々の試作品・開発技術から統合されたシステムとしての技術開発を行う。

新素材リチウムターゲット基板は、目的とする形状および当初予定の半分の流速での耐圧試験まで仕上がりに、強度に関しても現状問題ない。しかし、実使用での最大流速:250L/minでの耐圧試験はまだ行われておらず、この試験をクリアしないと完成とはいえないため、次年度早々にこの試験を繰り返し行い改良を加える。

パラジウムの水素の吸蔵・放出特性について、疑似での実使用条件でその効果が明らかになり、ブリストリング抑制効果が確認された。また、共晶反応による影響など他の課題も確認されたが、その解決策についても既に検討されている。実際に熱負荷を加えた際の強度試験も実用化においては必要な課題である。次年度は平成24年度に見えてきた課題を克服し、実用化技術として新素材リチウムターゲットのブリストリング抑制のための必須技術として確立させる。

フッ化マグネシウムの焼結体が安定して生成できる条件が確立しつつある。この焼結体をターゲットシステムに合うように高精度に加工する必要があり、非常に硬く脆い性質なことから、特殊な技術が要求される。この高度な技術開発を次年度では確立させる。また、焼結体個々の製品のばらつきについても評価を行い、クオリティの高い減速材の開発を目指す。次年度後期では他の開発品および開発技術との統合化を図り、単品としてではなくシステムとしての技術開発を行う。

リチウムターゲットでは約50kWもの熱量が発生するが、その除熱効率の向上に本新素材の効果が大変期待できる。その効果をより最適化するためにはその冷却システムの役割も重要である。平成24年度では冷却条件の決定から、冷却水の流量及び必要水圧を設定し、実際に冷却システムの開発を行い、その性能が確認されている。

ターゲットの陽子照射条件は急激な変化も考えられるため、その変化に追従できなければならない。

平成24年度では流量コントロールは手動で行われており、無負荷状態では安定して稼働が行える。しかし、実際の負荷が加わったときは、そのパワーも大きいことからマニュアルでの精密な制御には限界がある。次年度ではこの制御を自動で行えるようにする。制御系は一部平成24年度に準備しており、実際に即した若干の改良を行うことで自動制御が可能となる。

また、新素材リチウムターゲットの中性子源としての性能を最大限に引き出すためには中性子反射体が必須であり、その開発を平成25年度で行う。これにより高効率でBNCT用熱外中性子を活用することができる。