

科学研究費補助金 特定領域研究

「核融合炉実現を目指したトリチウム研究の新展開」

領域番号 476

(領域設定期間)

平成 19 年度 ～ 平成 23 年度

平成 19 年度報告書

平成 20 年 6 月

領域代表者

九州大学大学院・総合理工学研究院・教授

田辺 哲朗

目 次

- (1) 研究領域の概要
- (2) 研究領域の設定目的
- (3) 研究領域内の研究の年度毎の進展状況及びこれまでの主な研究成果
- (4) 研究領域の研究組織と各研究項目の連携状況
- (5) 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）
- (6) 研究成果公表の状況
- (7) 総括班評価者による評価の状況
- (8) 研究領域の研究を推進する上での問題点と対応策
- (9) 今後の研究領域の推進方策
- (10) あとがき

[添付資料]

1. 文科省に提出した「研究計画・事業報告書」
2. ニュースレター（1～4号）
3. 総括班主催シンポジウム(3月14日開催)における報告図面
4. 第1回 公開シンポジウム(3月21-22日開催)における報告図面
5. 第2回 公開シンポジウム(3月28日開催)における報告図面
6. 各班の業績リスト（国内発表、国際発表、論文、著書）

(1) 研究領域の概要

核融合炉を実現する上で、安全な燃料（トリチウム）サイクルを構築することは、プラズマ閉じこめと並び立つ2本柱のひとつである。核融合炉では放射性同位元素であるトリチウム（T）を大量に取扱う必要があるにもかかわらず、放射能的にクリーンであると強調されすぎているきらいがある。核融合炉燃料として使用されるトリチウムは、平均約 6 keV の β 電子を放出して ${}^3\text{He}$ になる放射性同位元素であり、また DT 反応で発生する中性子が材料を放射化するため、十分な放射線管理のもとで放射性安全性を確保して運転される必要がある。エネルギー発生装置としての実用核融合炉は、経済的に見合うものであると同時に、安全性の観点から社会的にも受容されるものでなければならない。

本領域が目指すのは、トリチウム(T)と重水素(D)との核融合反応（DT 反応）によりエネルギーを取り出す核融合炉を実現するため、Tが放射性である故に、その放射性安全を確保しかつ経済的な核融合炉燃料システムを構築すること、即ち(1)炉内への D と T の導入量を、核融合反応を継続するために制御しつつ供給すること、(2)それらを排気回収し不純物を除去した上で、トリチウムを分離・再利用すること、(3)ブランケットによりトリチウムを増殖回収、利用すること、さらに(4)安全・高効率なトリチウムの燃料処理及び閉じ込めシステムの構築並びに制御を可能にするための技術開発をすること、である。またあわせて、トリチウムに関する正しい理解に基づいた新しい「トリチウム科学」ともいべき学問分野を打ち立てるとともに、トリチウムに対する正しい理解を社会に広めようとしている。

このため、次の研究項目について、「計画研究」により重点的に研究を推進すると共に、これらに関連する、一人又は少数の研究者による2年間の研究を公募する。また総括班を設置し、各研究計画の班長に加えて、これまでトリチウム研究に長年携わって来た我国の主だった研究者にも協力を仰ぎ、個々の研究班の個別の成果を評価検討して、全体的あるいは俯瞰的見地より、各研究班へのフィードバックをはかると共に、それらの成果を統括・連携して核融合炉全体としてのトリチウム安全対策を講じ、核融合トリチウムについての社会的受容性を高めるための活動を行う。

班名	研究課題	代表
総括班	核融合炉実現を目指したトリチウム研究の新展開	田辺哲朗
A01 班	核融合炉内複雑環境におけるトリチウム蓄積挙動の実験的研究	上田良夫
A02 班	核融合炉のトリチウム蓄積・排出評価のための理論およびシミュレーションコードの開発	大宅薫
A03 調整班	炉内へのトリチウムの蓄積と除去	上田良夫
B01 班	核融合炉ブランケット材中のトリチウム輸送現象解明と新規回収プロセス開発の研究	深田 智
B02 班	核融合炉ブランケット材料中のトリチウム-材料相互作用に関する研究	寺井隆行
B03 調整班	核融合炉ブランケットにおけるトリチウム共同解明	深田 智
C01 班	トリチウムの閉じ込めに関わる高濃度トリチウム水及び有機物の化学的現象の解明	山西敏彦
C02 班	トリチウムの透過漏洩と汚染・除染	波多野雄治
C03 調整班	核融合炉におけるトリチウム安全閉じこめ、漏洩制御のための技術開	山西敏彦

(2) 研究領域の設定目的

本特定研究領域設置の目的は、トリチウム(T)と重水素(D)との核融合反応(DT 反応)によりエネルギーを取り出す核融合炉を実現するため、トリチウム(T)を含んだすべての水素同位体(H,D,T)に関連する様々な学問的分野を背景としている研究者を組織化し、Tが放射性である故に、その放射性安全を確保しかつ経済的な核融合炉燃料システムを構築すること、即ち(1)炉内へのDとTの導入量を、核融合反応を継続するために制御しつつ供給すること、(2)それらを排気回収し不純物を除去した上で、トリチウム分離・再利用すること、(3)ブランケットによりTを増殖回収、利用すること、さらに(4)安全なシステムの構築あるいは制御を可能にするための技術開発をすること、である。同時にトリチウムに関する正しい理解に基づいた新しいトリチウム科学ともいべき学問分野を打ち立てるとともに、トリチウムに対する正しい理解を社会に広めようとするものである。

国際熱核融合炉 ITER が南仏カダラッシュに建設されることになり、かつて経験したことのない多量の放射性同位体トリチウムの使用が必然化される。ITER でのトリチウム使用に関する最大かつ緊喫の課題は、どれだけのトリチウムを ITER 装置に供給し、どれだけが回収され、残りが装置内部のどこにどれだけ停留あるいは蓄積していくか、を明確にすることである。またその際の収支の不釣り合いは、例え計測の誤差範囲内であれ、トリチウム安全性の観点からは無視できない。さらに、実際にシステムからトリチウムが透過・漏洩することも避けられない。この透過・漏洩はトリチウム収支からみれば誤差範囲内に過ぎない極微量であっても、透過・漏洩してくる側から見れば、トリチウム汚染につながり、安全性の観点から重大な問題を引き起こす。

実際に核融合炉で燃料サイクルとして循環使用されるトリチウムの総量は、重さにすればわずか数 kg 程度であるが、放射能レベルで言えば 10^{17}Bq (=100PBq; 1秒間に 10^{17} の β 電子を発生させる) という想像を絶する量である。参考図1に核融合炉で使用するトリチウム量、自然界の存在量、安全性のための規制が必要等量を比較した。図からもわかるように、核融合炉では、安全性の観点から定められている規制値に比べると10桁以上も多い量のトリチウムを使用しなければならないため、ITER のような実験炉でも、わずか100回程度のDT放電でその立地での使用許可量を超えるトリチウムが真空容器内に蓄積されてしまい、頻繁にその除去作業を余儀なくされるとして、安全性・経済性の観点からの核融合炉の実現を危惧する声すらある。

このような多量のトリチウムを取り扱った経験は、日本はおろか世界にも(軍事研究を除けば)全く無く、その安全な取り扱い技術が確立されているとは言えない。またトリチウムの放射性同位元素としての特性、またその安全性についても十分理解しているとは言えない。一般社会や他分野の理・工学研究者はもとより、核融合研究者内においても、核融合の研究と称しながら、トリチウムは怖いからとその使用をためらったり、あるいは核融合炉にかかわるトリチウムの放射線安全性についての正確な認識を欠いたまま、いたずらに安全性が喧伝されたりする事があった。

昨年行われた放射線規制法の改正によりT使用規制量の大幅な緩和が行われたことから明らかなように、Tの放射線影響は他の放射性物質に比べ極めて弱い。しかし、一般には極微量でも非常に危険であると信じられており、安全性の観点において事実と一般的な認識の間に大きな乖離が見られる。この乖離を放置すると、一般社会と核融合研究者間の相互信頼性を欠くことになり、これからの核融合炉開発に社会的受容性が得られなくなる危険がある。かつて経験をしたことのない多量のトリチウムを使用する燃料サイクルの構築とその安全性確保、さらには社会受容性を得ることは、その挙動の理解と正確な予測なしにはあり得ない。

(3) 研究領域内の研究の年度毎の進展状況及びこれまでの主な研究成果

計画研究各班の初年度の研究成果を以下に簡単にまとめた。(6)研究成果の公表の状況に記述されているように初年度であるにもかかわらず、数多くの学会発表(国内、国際)や論文投稿がなされた。計画研究班相互での研究成果の共用、今後の研究展開へのフィードバックは、今年度中旬に研究会を開催して行う予定である。

	成果の要約(出版物等を除く)
総括班	総括班としてホームページを立ち上げ、維持・改良、4回の班会議、4回のニューレターの刊行さらに、キックオフミーティング、2回の公開シンポジウムを通じて、領域分担研究者の相互研究紹介、その内容の理解をはかるとともに、共通の問題点抽出、各計画研究の進め方についての示唆を行ってきた。またテーマを縛ったワークショップを開催し研究内容の深化をはかってきた。今年度総括班の評価員に評価をお願いした(本報告に記載)ので、来年度以降に、これも活かしてゆく予定である。
A01	タングステン材料に対し、複合イオン照射をイオンビームや高密度プラズマで行い、水素同位体蓄積挙動と深く関わるブリスタリングやバブル発生に及ぼす影響を明らかにし、さらに高エネルギーイオンビームによる照射損傷が水素同位体蓄積や拡散に及ぼす影響を明らかにした。炭素材料に対し、高密度プラズマ照射によるダスト形成条件を明らかにし、さらにJT-60Uトカマク装置におけるタイルギャップ等への再堆積層の分布とその水素同位体吸蔵特性を明らかにした。また、パルスレーザーやグロープラズマの照射による炭素材等からの水素同位体脱離挙動を明らかにした。
A02	境界層プラズマおよびプラズマ・壁相互作用関連コードを開発している国内外の研究者によるトリチウム炉内輸送に係る連携研究を立ち上げ、境界層プラズマ不純物輸送コードとプラズマ・壁相互作用コードを統合化し、トカマク等の実形状・実磁場配位で自己無撞着な不純物輸送評価が可能となった。炭化トリチウムの発生要因となるグラファイトの化学スパッタリングや炭化トリチウムの炉壁相互作用を模擬する分子動力学コードを開発し、プラズマ対向壁タイルの隙間等、プラズマに直接晒されない部分への炭化トリチウムの再付着率を評価した。一方、水素同位体原子を多重捕獲した単原子空孔の第一原理計算による挙動解析を進めた。
B01	核融合炉固体あるいは液体ブランケットのトリチウム挙動解明と回収装置設計をプロセス工学的な観点から研究した。特に固体ブランケット材(Li ₂ TiO ₃ , Li ₄ SiO ₄ , LiAlO ₂)については、マクロ物質収支とマイクロ吸着、反応、同位体交換の速度式で解析し、実験結果と比較検討し、ITER-TBMのトリチウム挙動の数値的予測をおこなった。液体ブランケットについては、液体LiブランケットからのYによるトリチウム回収を1ppm以下まで世界で始めて実験的に証明した。Li ₁₇ Pb ₈₃ の水素と重水素の溶解度と拡散係数を非常透過法により求めた。熔融塩FlibeからHeスウィープガスによるトリチウム放出実験をおこない、トリチウム拡散係数、同位体交換速度等のパラメータと関係づけて整理した。
B02	各種トリチウム増殖材料の内部、表面、及びその近傍におけるトリチウム挙動の素過程について研究した。2LiF-BeF ₂ 混合熔融塩及びトリチウムタイトネートについては東京大学原子炉「弥生」にて高温照射し、核変換により生成したトリチウムの放出挙動を詳細に検討する事により増殖材料中でのトリチウム化学形変化や放出速度を明らかにした。熔融金属トリチウムについては、純鉄配管を通しての水素及び重水素の透過漏洩挙動を試験した。また、トリチウム透過抑制セラミックコーティングの試作を抑制能の測定を行った。
C01	高濃度トリチウム(T)水及び有機物の化学的現象の解明を目的として、基礎研究を行うものである。19年度においては、金属に対する水・水蒸気へのトリチウム移行挙動の測定を開始した。また、金属のトリチウム水による腐食及び有機物とトリチウムの相互作用に関する研究に関しては、これまでの研究をレビューし、実験装置を製作して今後の研究計画を構築した。トリチウム水の機能的閉じ込め(回収・処理)に関しては、固体電解質を用いた高濃度トリチウム水電解、大型化学交換塔を用いたトリチウム分離実験等を行った。これら成果を、トリチウム国際会議等で発表した。
C02	まず、汚染ステンレス鋼からのトリチウム放出実験を行い、室温でも表面に吸着したもののみならずバルク内部からもトリチウムが継続的に放出されること、主な放出化学形が内部被曝の危険性が高い水蒸気状であることを明らかにした。一方、バナジウムについても調べ、ステンレス鋼に比べトリチウム放出に対する表面酸化膜の障壁効果が高いことを見出した。表面酸化膜中におけるトリチウムの存在状態と脱離速度との関係や、原子から水蒸気への化学形変化機構を調べるため、表面分析を進めると共に、量子力学計算の妥当性を確認した。加えて、高温配管からのトリチウム漏洩を抑制するための透過防止障壁膜の成膜条件の最適化や透過化学形、およびトリチウム捕集・計測技術に関する研究を行った。

(4) 研究領域の研究組織と各研究項目の連携状況

すでに述べたように本領域で総括班のもと3研究班、6計画研究組織体制を構築している。この際、協力研究者として、単に従来からトリチウムを取り扱ってきた研究者にとどまらず、軽水素、重水素をもちいて核融合研究を行ってきた研究者、水素—固体相互作用の研究者等を加え新たな組織化をはかった。

研究 A 班:「炉内へのトリチウムの蓄積と除去」

(A01 班) 核融合炉内複雑環境におけるトリチウム蓄積挙動の実験的研究

(A02 班) 核融合炉のトリチウム蓄積・排出評価のための理論およびシミュレーションコードの開発

この班で課題とするのは、炉内のトリチウムインベントリーの評価と蓄積、そして蓄積トリチウムの除去である。これらは PFM の材料や炉の温度、プラズマ条件等により大きく変化するが、これを基礎現象の積み重ねであるとして、理論およびシミュレーションによってモデル化し予測可能にするというシナリオとなる。実機はこのためのテストベッドと位置づけられる。また A02 班は A 班にとどまらず、B 班、C 班の理論・シミュレーション研究に協力し相互の研究の調整、整合性を確保する。

研究 B 班:核融合炉ブランケットにおけるトリチウム挙動解明

(B01 班) 核融合炉ブランケット材中のトリチウム輸送現象解明と新規回収プロセス開発の研究

(B02 班) 核融合炉ブランケット材料中のトリチウム—材料相互作用に関する研究

この班では燃料の供給と排出のバランスを考慮しなければならない。現時点で、実際の炉を念頭に T を循環させるシステムは、それなりに設計出来よう。しかし現実の DD 実験装置ですら供給した D は回収しておらず、どのような化学系でどれだけ排気されるかは不明であり、データの取得が必要不可欠である。また実際に核融合炉で想定される供給トリチウムの全量回収をどのように行うかを明確にする必要がある。これを実機 (LHD および T-60U/SA) および基礎実験で行うこととする。同時にブランケットからの回収も極めて重要であり、固体・液体を問わずトリチウム回収の観点にテーマを縛りこんだ。実際に中性子照射環境下での実験も行う。

研究 C 班:核融合炉におけるトリチウムの安全閉じ込め、漏洩制御のための技術開発

(C01 班) トリチウムの閉じ込めに関わる高濃度トリチウム水及び有機物の化学的現象の解明

(C02 班) トリチウムの透過漏洩と汚染・除染

多量トリチウムを扱う際の最大の懸念は、透過・漏洩と汚染である。カウント測定から PVT 測定へのつなぎ、さらには熱量測定へのつなぎ、そしてその有効測定桁数の問題、および固体中に存在するトリチウムの絶対測定(熱量測定レベル以下での)、いずれもいまだ未解決である。A 班が担当する主燃料循環系と B 班が担当する増殖トリチウム回収系におけるトリチウムの化学形態変化に関する基礎的な知見をベースに、従来のプラント外に移行するトリチウムを単純に回収除去する対策にとどまらず、核融合発電プラント内の作業環境中へのトリチウム漏洩をきめ細かく抑制するための技術開発を想定している。この際トリチウム特異性を考慮したトリチウム理工学の体系化に努める。

以上のように計画研究では A 班が「炉内へのトリチウムの蓄積と除去」、B 班がそれを取り囲む「核融合炉ブランケットにおけるトリチウム挙動解明」、C 班が「核融合炉におけるトリチウムの安全閉じ込め、漏洩制御のための技術開発」と全体を取り囲む形になっており、相互の緊密な連携無しには計画の進捗はあり得ない。従って、下記のように全体の関与するシンポジウムや研究会を5回開催し、お互いの研究状況を知るだけでなく、相互に、研究テーマや研究進展について、意見交換や互いの要望の交換を行った。

9月12/13日 科研特定領域「核融合炉トリチウム」キックオフミーティング(核融合科学研究所)

2月19日 トリチウムに関する共同研究会(総括班共催、核融合科学研究所)
 3月14日 水素透過および捕獲に関する意見交換会(九大)
 3月21/22日 公開シンポジウム(第1回)「19年度成果報告会」(名古屋)
 3月28日 公開シンポジウム(第2回)「核融合炉実現のためのトリチウム研究の新展開」(阪大)
 さらに下記のように各班内で合同の班会議を開催し、さらに詳細な点での班内での意見交換を行った。

10月19日 C1&C2 班合同班会議(第1回)

2月4/5日 A1&A2 班合同班会議

3月11日 C1&C2 班合同班会議(第2回)

2月4日 B1&B2 班合同班会議

あわせて、各会議での発表の総括、及び使用されたビューグラフ(非公開のものを除く)は web で公開し、共通理解が持てるようにした。

総括班:核融合炉実現のためのトリチウム研究の新展開

各研究計画の班長に加えて、これまでトリチウム研究に長年携わって来た我国の主だった研究者に協力を仰ぎ、個々の研究班の個別の成果を評価検討して、全体的あるいは俯瞰的見地より、各研究班へのフィードバックをはかると共に、それらの成果を統括・連携して核融合炉全体としてのトリチウム安全対策を講じ、核融合トリチウムについての社会的受容性を高めるための活動ができる研究組織とした。さらに、総括班には、一般社会へトリチウムの正しい理解が浸透するよう情報発信を行い、トリチウムの安全性、核融合の社会的受容性を高めると同時に、水素同位体理工学ともいべき啓蒙書の発刊を行うという目標を課する。

評価委員

総括班に評価委員として、日本の核融合科学と核融合炉工学推進のそれぞれの指導者に加え、ITER 建設の立場からの評価を伺える方々を加え、研究結果、研究の進め方等への、鋭い辛口の批評および評価をいただき、研究の質をより良くするとともに、研究の効率を上げていく。

研究	総括班		役割分担
代表者	田辺 哲朗	九大院・教授	研究の取りまとめ、炉内トリチウム蓄積の制御と除去
分担者	上田 良夫	阪大院・教授	調整班Aの研究方針策定と研究計画の取りまとめ
	深田 智	九大院・教授	調整班Bの研究方針策定と研究計画の取りまとめ
	山西 敏彦	原子力研究開発機構 トリチウム工学研究室長	調整班Cの研究方針策定と研究計画の取りまとめ
	西川 正史	九大院・名誉教授	トリチウム安全性確立のための戦略設定
	田中 知	東大院・教授	経済的なトリチウムサイクルの確立への方策
	山本 一良	名大院・教授	水素同位体としてのトリチウムの物理と化学の整理・体系化
	朝倉 大和	核融合研・教授	システム安全性の評価、広報および事務担当
	評価委員	本島 修	核融合研・所長
高津 英幸		原子力研究開発機構 ユニット長	評価者(核融合炉工学の立場)
嶋田 道也		原子力研究開発機構 ITER協力調整グループ 研究主幹	評価者(エネルギー科学の立場)

(5) 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）

各研究計画班とも領域発足の初年度であり、すみやかな研究の立ち上げと、設備の整備の両方を矛盾無く進める事に腐心した。また備品の整備にあったっては、重複する備品がないように、あらかじめ各研究計画班で打ち合わせも行った。下記に整備した備品と用途を示した。すべての備品が順調に稼働している。質量分析計のみ重複整備されているが、水素を検出するための基本的計測器であり、共用では利用できないのでやむを得ないと考えている。

研究班	設備備品名	仕様	台数	価格	納入場所	用途
A01	マグネトロンスパッタ源	3インチ径・TM3U・ベーク可能	1台	1,414,000	大阪大学	混合イオン照射時の壁材料の損耗研究、および複合堆積膜の作成
	プラズマプロセスモニター	測定質量範囲1~512 PPM422・測定チャンネル	1台	15,015,000	大阪大学	混合イオン照射時に壁材料から発生する損耗粒子の直接測定
	質量分析計	測定質量範囲0~6 MicroVision Plus	1台	2,266,110	北海道大学	重水素・ヘリウム同時照射された試料からの脱ガス測定(HeとD2分離)
	パルスサー	パルス高1V・EG&G419	1台	857,115	京都大学	高エネルギーイオンビームを利用したNRA測定システムの高性能化
A02	ハイパフォーマンス・コンピュータ一式	HPCシステムズ(株) BoxClusterML-SIP (3.0M12-4/1-4G3ntg)	1式	1,498,953	徳島大学	炭化水素同位体と材料との相互作用の分子動力学計算と、炉内プラズマ対向壁の炭化トリチウムの再付着・トリチウム蓄積分布のシミュレーション
	ハイパフォーマンス・コンピュータ一式	HPCシステムズ(株) VASP 用5ノードクラスタ計算機	1式	9,948,750	自然科学研究機構核融合科学研究所	水素同位体を多重捕獲した材料中単原子空孔の挙動の第一原理分子動力学計算と、材料表面反射トリチウム原子の励起状態分布の量子力学計算
	DELL PCハードウェア及び5ノードクラスター一式	HPCテクノロジーズ(株) DELL PE1950 x 5, 液晶モニタ, OS, Fortranコンパイラ	1式	5,059,425	慶應義塾大学	不純物モンテカルロ輸送モデルにおける炭化トリチウムなどの不純物発生モデルの高度化、詳細化と、背景プラズマ流体輸送コードとの結合によるダイバータプラズマの総合的モデリング
B01	水分計	GEセンシング製・MMS-35卓上型	1台	1,995,000	原子力研究開発機	ブランケット模擬排ガス処理実験のための、ヘリウムスウィープガス中の水蒸気濃度監視用
	トリチウム電離箱	応用技研製・C-122低濃度型	1台	947,625	原子力研究開発機	ブランケット模擬排ガス処理実験のための、ヘリウムスウィープガス中のトリチウム濃度測定
	エレクトロメーター	応用技研製・AE-730B5mケーブル付	1台	1,645,875	原子力研究開発機	上記トリチウム電離箱出力を高感度に測定するための特殊電流計
	圧力流量制御器	日本MKS製・722A-13T-CD-3-F-A	1台	628,425	原子力研究開発機	ブランケット模擬排ガス処理実験のための、ヘリウムスウィープガスの圧力流量制御装置
	冷却水循環装置	アルバック製・CA-3110	1台	674,730	九州大学	核融合炉ブランケット模擬装置を一定温度に維持するための冷却水循環装置
	ターボ分子ポンプ排気ユニット	アルバック製・YTP-300M	1台	2,277,450	九州大学	核融合炉模擬排ガス分析処理装置用高真空排気装置
	マイクロscopeフォーカスタジオ	ナカデン製・中倍率FS1400	1台	693,000	九州大学	金属試料表面状態観察用デジタル変換可能顕微鏡
B02	高速昇温電気炉	型式:NL-2025D	1式	1,995,000	東京大学	固体増殖材試料焼結用電気炉
	四重極質量分析計	型式:M-101QA-TDM(Y)	1式	1,689,975	東京大学	増殖材中の水素同位体放出量の高精度測定装置
	遊星回転ミル	型式:LP-1 回転数:最高回転450rpm	1個	787,500	東京大学	固体増殖材試料作成用粉末の均一性を高めるための微粒子化を行う装置
	クラスター計算機システム		1式	2,520,000	東京大学	増殖材中のトリチウム挙動についてのモンテカルロ計算の実施とMD計算用ファイルを作成するための計算機システム
	増殖材用水素透過抑制試験装置		1式	5,670,000	東京大学	増殖材と接する高温セラミックコーティング材を通してのわずかなH,D,T透過を高精度に測定しトリチウム透過抑制能を試験する装置
	トリチウム化学系分離連続測定装置		1式	9,450,000	東京大学	炉照射下での高温トリチウム増殖材料から放出されるトリチウム放出速度について化学形態を分離しながら連続測定する装置
C01	高性能EDX装置の増強	キーエンス(株)	1式	12,390,000	原子力研究開発機	材料表面分析用高性能エネルギー分散型X線分析装置
	EDX解析ソフトウェア	キーエンス(株)	1式	4,410,000	原子力研究開発機	EDX元素分析情報用、2D-3Dスペクトラム計測マッピング解析ソフトウェア
	水槽 SUS304アングル組立ガラス窓 水素ガス酸化サンプリング装置	名城科学(株)製組み立て	1式	913,500	名古屋大学	組み立て式水槽
C02	フルオロ・イメージアナライザー	富士フイルム(株) FLA-7000IP	1台	8,223,600	富山大学	汚染材料中のトリチウム分布を、イメージングプレート法で測定するのに用いる
	DAR400 X線源パッケージ	アルバックファイ(株) DAR400	1式	7,350,000	富山大学	X線光電子分光法により、トリチウム汚染材料の化学的表面状態を分析するのに用いる
	超高真空赤外線導入装置	(株)サーモ理工 GHV198	1台	1,890,000	富山大学	トリチウム汚染材料模擬試料調製のための、トリチウム曝露装置における試料加熱に用いる
	ターボ分子ポンプ	三菱重工(株) PT-50	1台	556,900	静岡大学	多重イオン照射-昇温脱離実験装置用イオン銃のガス充填に用いる
	質量分析計	MKS(株) e-Vision 質量数0-100	1台	1,205,820	東京大学	表面分析-昇温脱離実験において脱離ガスの分析に用いる

(6) 研究成果公表の状況

① 論文

19年度中に掲載された論文は、査読つき；76件、査読無し（総説、解説を含む）；7件である。各計画研究班ごとの論文一覧を添付資料「各班の業績リスト」に示す。

② 学会発表（国内）

国内の学会で120件の発表を実施した。各班ごとの内訳を以下に示す。

A01班；52件、A02班；20件、B01班；23件、B02班；6件、
C01班；9件、C02班；10件

一覧を添付資料「各班の業績リスト」に示す。

③ 学会発表（国際）

国内外の国際会議で79件の発表を実施した。各班ごとの内訳を以下に示す。

A01班；31件、A02班；8件、B01班；20件、B02班；2件、
C01班；11件、C02班；7件

一覧を添付資料「各班の業績リスト」に示す。

④ ホームページ

総括班事業として、2007年9月にホームページを開設 (<http://tritium.nifs.ac.jp/>) し、以降、随時（月2回前後）更新を行ってきた。この間、研究会や各班会合の開催案内を「カレンダー」として掲載すると共に、最新の研究成果報告資料については「プロジェクト資料」として、議事録と共に、公開可能な報告資料はすべて公開している。

⑤ 公開シンポジウム

総括班事業として2回の公開シンポジウムを企画・開催した。うち1回は19年度の成果報告会である。他の1回は、日本原子力学会での企画セッションとして開催した。各シンポジウムのまとめ（総括）と使用されたビューグラフを添付資料「第1，2回公開シンポジウム」に示す。

⑥ ニュースレター

下記内容で、1号から4号までのニュースレターを発行した。詳細は添付資料「ニュースレター」に示す。ニュースレターはホームページで公開すると共に、核融合工学部会及び核融合ネットワークのメーリングリストを利用させていただき、Webで関係者に広く配信した。

<発行 No.>	<発行日>	<主な内容>
1号	H19年9月12日	・新領域発足に当たって（田辺哲朗） ・新領域発足を祝って（西川正史） ・計画研究班紹介（各計画班長） ・公募研究募集案内
2号	H19年12月1日	・トリチウム研究の意義（田中知） ・計画研究の進め方（各班長）
3号	H20年4月24日	・第1回、2回公開シホ ^o 報告 ・公募研究採択結果
4号	H20年5月14日	・各計画研究の成果（各班長）

(7) 総括班評価者による評価の状況

総括班事業として行ったミーティング、シンポジウム、研究会の後には必ず総括班会議を開催し、行った事業の総括を作成し、事業で使われたビューグラフを公開して、事業に参加いただけなかった評価者のみならず、第三者からの評価も可能なようにしてきた。研究報告会で総括班および評価委員より指摘された意見は次の通りである。(1)過去の研究結果やすでにわかっている物理/化学を十分 Refer し respect すること、(2)特定領域「核融合炉実現のためのトリチウム研究の新展開」の意義と目的に則ったものであること。(3)様々な物理、化学状態の水素同位体、トリチウムの挙動、材料との相互作用:学術研究と領域形成、充実をはかること。(4)“表面状態”、“交換反応”、“同位体効果”等 物理化学にのっとった共通の理解と、理解の深化をはかること。(5)シミュレーション、あるいは第1原理計算においては、特にその学術的な意義や新規性等について自問自答しながら進めること。(6)人材育成と維持を積極的に推進すること。

また以下に3名の評価者のそれぞれの1年目の本事業に対する評価を記す。

特定領域研究「核融合炉実現を目指したトリチウム研究の新展開」への評価意見

核融合科学研究所 本島 修

本特定領域研究の平成19年度の研究成果報告を検討しその評価をここに述べる。

核融合エネルギーの実現を目指す研究は、国際核融合実験炉計画 ITER での本格的な核燃焼トリチウムプラズマ実験が国際協力で進められる一方、核融合科学研究所でも重水素実験によってヘリカル閉じ込め方式による科学的実証に向けたプラズマ研究が一段と加速されており、プラズマ容器内外でのトリチウムの挙動を工学的に把握することが核融合炉実現への加速に大きな貢献をすると期待される段階に差し掛かっている。高温のプラズマと物質表面での相互作用は、原子分子動力学に基づく理解を必要としており、わけでも物質中のトリチウムの挙動は複雑な現象を伴うため、その理解には今後も多くの研究努力が必要である。本特定領域研究ではこれらの興味深く重要度の高い課題を解決するため、核融合炉の体系の中にあるトリチウムの挙動を局所的に且つ総括的に把握することを目的として設定されている。A 班ではプラズマ容器内部、特にプラズマ対向材料再付着層形成におけるトリチウムの挙動を解明することを目的として活動を始めており、これまで永年にわたって蓄積されてきたプラズマ科学の視点からの研究成果と本研究の目指す材料面からのミクロの視点および工学的なマクロの視点からの現象把握との相乗効果が核融合プラズマの安定制御に貢献すると期待させるものである。B 班では実用核融合炉の燃料自己補給を維持するために不可欠なブランケットにおけるトリチウムの増殖挙動を解明していくことに主眼を置かれているが、液体ブランケットと固体ブランケットのいずれが有効な手段であるかを工学の立場からの学術的に解析することは、ITER テストブランケット(TBM)の設計課題としての役割にとどまらず、磁場閉じ込め、慣性閉じ込め等に共通する核融合エネルギー実用化に向けての重要な問題解決策を提供することとなる。本特定研究では現在では固体ブランケットのトリチウム挙動解明関連の成果が先行している様子が伺われるが液体ブランケット関連の研究も着実に進んでいると判定される。トリチウムの環境への漏洩を防ぐための C 班の研究もトリチウムの特異性を考慮して一段と学問的深化を達成しつつあることが成果内容から見て取れる。

平成20年度からは公募課題も本特定研究に参加して来るが、プラズマ研究者からの応募研究課題も A 班関連で数件採択されている。核融合炉研究はプラズマ装置としての研究がまず出発し先行して来たが、最終目標である核融合エネルギー実用プラントはプラズマ容器を中心とするトリチウム反応装置の集合体としての性格を持っている。このため、プラズマ研究者のトリチウム研究への参加は核融合エネルギーの実用

化を目指す核融合研究の最終段階の到来を期待させるものである。

以上を総括すると、本特定研究は平成 19 年度には初年度として満足するに足る研究成果をあげており、平成20年度以降には一段の進展を期待させる体制にまとまりつつあるものと判断される。

高津英幸、原子力研究開発機構ユニット長

本特定領域研究が活動開始して実質まだ半年程度であるが、リーダー層の適切な主導によりネットワークの構築が円滑に進められ、活動そのものの立ち上げもスムーズに進んでいると判断でき、その結果、既に多くの研究成果が発表されるなど、着実に活動の成果が挙がってきていると評価できる。特に、日本のトリチウム研究の持つ底力を引き出し、プラズマ対向材からトリチウム安全性まで、多様な分野の研究者を一同に結集することで、当該関連分野にかかる知のネットワークが構成され、それが短期間での成果に繋がっているものと高く評価したい。今後、公募研究も含めて活動が本格化する中で、研究本来の進展は元より、多くの若手研究者が育つこと、研究の人材の面での裾野が広がることなどにも期待したい。

昨年 ITER 計画が公式活動を開始し、核融合研究は nuclear-facility の時代に入ったと言えるであろう。ITER はもとより、将来の核融合炉を実現する上で、安全な燃料(トリチウム)サイクルを構築することは、最も重要な工学課題の一つである。核融合炉において使用される多量のトリチウムの挙動やその特性を予測し、トリチウムを安全に取り扱えるシステムの構築の確立を図ることが、本特定領域の研究目的と理解され、それは、核融合研究開発の長期ロードマップの横軸に照らしても、まさしく時宜を得た研究活動であると理解される。トリチウム取り扱い技術を工学的立場で見た場合、非常に広範囲な濃度(多量のトリチウムを使用したプラズマと、作業環境での極低濃度のトリチウムまで)、温度(プラズマ状態から液体水素状態まで)、化学種(水素、水、有機)を対象とする特異な領域であり、本特定領域研究の目指すところ(トリチウム理工学として学術の体系化、水素同位体の理解を極めること)の重要性が改めて認識されるところである。

一方、核融合炉の成立には、トリチウムと熱エネルギーの取り出しの中核を担う機器であるブランケットの研究開発の進展が重要であることは論を待たない。ブランケットは、トリチウムを増殖し、システムの中でそのトリチウムを閉じ込め・回収しながらエネルギーを取り出すところであり、まさに上述のトリチウム技術の研究開発と表裏一体をなすものである。本特定領域研究において基礎研究の成果を挙げ、今後長期にわたって進める ITER での研究及びその先の原型炉開発の道を開くことを期待する。

ITER が仏に立地されることに決まったこと、ITER 工学設計活動が成果を得てから建設開始までに時間を要したことなどで、日本におけるトリチウム関連研究の停滞感、関連研究者の固定化、企業における関連活動の低下等、様々な課題が散見される状況であったが、本特定領域研究における活発な研究活動により、その閉塞感を打破し、研究の活性化に大きなインパクトを与えることを大いに期待したい。

嶋田道也、ITER 開発機構 核融合科学技術部門主任研究官

トリチウム挙動を解明するトリチウム科学、及びトリチウム処理技術を開発するトリチウム工学についての研究領域が科学研究費補助金のもとで立ち上げられ、初年度から成果を挙げている。これは ITER の建設開始を間近に控えた現在、時宜を得た貴重な研究成果である。とくに A01 のダスト形成条件の解明、タイルギャップなどへの炭素再堆積とその水素同位体吸蔵特性の解明、及び水素同位体除去の研究、A02 の炭化トリチウムの再付着の評価は、ITER のエネルギー科学の推進、及び ITER の研究計画策定にとって非常に重要な成果であり、今後のさらなる進展が期待される。

(8) 研究領域の研究を進展する上での問題点と対応策

審査に係る意見として下記を頂戴した

本研究領域は、トリチウムの取り扱い技術を中心に放射性物質の基盤技術を広く我が国に育成することを目的としている。トリチウムの安全利用は社会的、国際的に緊急の課題となっており、大学でのトリチウム研究の活動を支えるためにも本研究領域は重要である。また研究計画は明確であり、総括班を中心に有機的に良く組織されている。公募研究の位置付けも十分に配慮されている。以上の理由により、特定領域研究として採択すべきであると判断した。一方、本研究課題は開発要素が強く、特定領域研究として遂行する必要性に疑問があるとの意見もあった。また、学術としてのトリチウム研究の方向性、および日米共同研究とのすみ分けや ITER(国際熱核融合実験炉)の位置付けが明確ではないとの指摘もあった。今後はこれらの指摘にも配慮しながら、具体的な研究計画が策定されることを期待する。

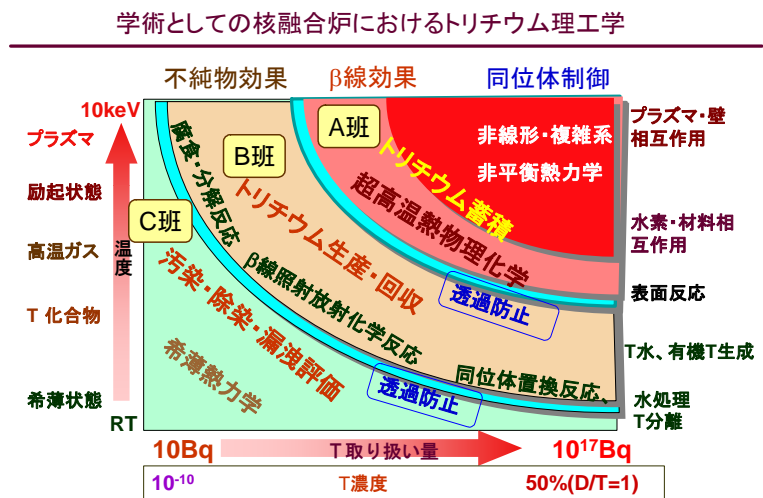
これに対して以下のように対応している。

「本研究課題は開発要素が強く、特定領域研究として遂行する必要性に疑問がある」とのご意見に対しては、キックオフミーティングにおいて、過去の知識や知恵を有効に使い、試行錯誤的な研究にならないこと、例え工学的試験等であっても、それを整理するに当たって、その底にある物理現象や化学現象を読み取り、後に引用されるに値する物理・化学パラメータの抽出に努めるように特に注意を喚起した。これは総括班全員でも一致した意見であり、学術の観点からのトリチウム理工学を完成させる目安を整理し、添付図を作成し全員に配布公開した。これにより分担者の研究が学術的のどの位置にあり、班相互の関係がどのようになっているかを明確に出来たものと信じている。

研究をスタートさせる組織に関しては、総括班でも議論した結果、特に組織を変更する必要はないと判断し応募申請書通りの班構成、人員構成(一部やむを得ない事情にて、交代した計画研究分担者3名をのぞく)でスタートさせた。

A班、B班、C班の相互の連携、情報の共有については班構成の性格上(A班が炉心周辺、B班がそれを取りまくブランケット等のエネルギー変換部、C班が全体に関わる安全性)必然的ではあるが、個々の研究に埋没しないよう、キックオフミーティング、班会合、19年度成果報告でおよびニュースレター等で、領域の全研究分担者に伝え意志統一をはかった。

一部研究分担者が日米共同研究にも関連しているのは事実である。しかし、日米共同研究では、材料の欠陥と水素またはトリチウムとの相互作用という極めて限られた視点、かつ near target の研究であり、核融合炉安全性を追及するとともに学術としてのトリチウムをきわめることを目標とする本領域とは明確に一線を画すことをあらためて要請、同意をえた。また ITER に関しては、本領域の知識や結果を最大限注入できるようにつとめる。ITER でトリチウム安全が損なわれるようなことになれば、核融合炉の建設はおぼつかない。



(9) 今後の研究領域の推進方策

(次年度以降の計画の変更や研究領域をさらに発展させるための方策等)

評価委員からの特に具体的に改めるべき点の指摘はなく、また審査に関わる意見も、昨年度で対応できていると考えられるので、基本的には当初の計画通りすすめる。ただし、年度途中で、全体会合、および総括班会議を開催し、もし必要であると判断されれば、研究計画の修正をもとめることも念頭に置く。今年度より採用された公募研究（下表）がスタートするので、これら公募研究代表者とも緊密な連携のもとに研究をすすめる。

すでに、4月30日に総括班と計画研究代表者および採択された公募研究者が集って、研究打合会を開催し、公募研究代表者には計画研究代表者がもつトリチウムの実験施設（特に富山大および原子力機構）を有効に活用していただくための方策も検討した。もちろん分野間で施設の融通、効率的な利用もはかっていく。

昨年度テーマを絞った形で、「金属中の水素」に関して徹底的な討論会を企画・開催、非常に好評であった。トリチウムに特化せず、水素としての一般性から学術を極めることは極めて重要であり、年1-2回程度テーマを絞った形で領域全体からの参加者および外部からの招待者を交えた討論会を引き続き企画・開催し、単なる技術開発に終わらないよう戒めていく。

要望 今年度より分担研究者にはすべて、予算を配分することになったが、総括班および調整班に限っては、その縛りをおぼろげにしたい。ほとんどが会合費、旅費、会議費、等であるため、事務手続きが煩雑で、しかも所属する組織によっては提出する書類も異なり、むだな事務量が増える。

研究項目	研究課題名	氏名	所属機関	職名
A01	壁排気特性における臨界入射束の役割と同位体効果の解明	函子 秀樹	九大応力研	教授
A01	高分解能質量分析装置を用いたJT-60Uの排気ガス分析	林 孝夫	日本原子力研究開発機構	研究職
A01	DTコインシデンス核反応分析法による固体表面トリチウム保持量の高精度測定	落合 謙太郎	日本原子力研究開発機構	研究職
A01	核融合プラズマ中を運動するダストのその場測定と運動モデルの開発	朝倉 伸幸	日本原子力研究開発機構	研究主幹
A02	プラズマ対向壁近傍の不純物発光分布解析によるトリチウム・プラズマ壁相互作用の研究	河田 純	詫間電波工業高等専門学校	准教授
A02	トリチウム燃料注入と壁不純物挙動のシミュレーション解析	山崎 耕造	名古屋大学大学院工学研究科	教授
B01	低温吸着法水素同位体分離における減圧脱着挙動	古藤 健司	九州大学工学系研究科	准教授
B02	液体ブランケット用水素(同位体)センサー・ポンプの電極高度化研究	近藤 正聡	核融合科学研究所	助教
C01	近赤外分光法による新規トリチウム水蒸気検出法	小林 かおり	富山大学理工学研究部	准教授
C02	イメージングプレートを用いた制動放射線によるトリチウムの非破壊定量評価法の開発	大内 浩子	東北大学薬学研究科	助教
C02	金属中のトリチウム吸放出挙動に及ぼす金属表面に偏析(吸着)したトリチウムの影響	大塚 哲平	九州大学総合理工学研究科	助教
C02	材料表面におけるトリチウムの挙動及び効率的な除染方法に関する研究	小林 和容	日本原子力研究開発機構	研究副主幹

(10) あとがき（事務局より）

西川先生のご指導で始まった核融合炉トリチウムに関する特定領域研究の申請が、田辺先生に引き継がれ、両先生初め、関係各位の暖かいご指導と熱心なご協力により、19年度にようやく採択に至り、1年目の報告書を充実した内容で発行できますことを、事務局として心から感謝いたします。

報告書を取り纏めて感じますことは、将来の核融合炉で不可欠になるトリチウムの取扱いに関わるさまざまな物理化学現象に対して多面的かつ詳細に研究のスポットライトが当てられ、その成果が公開シンポジウム等での報告図面に新しい知見として蓄積・凝縮されつつあるということです。領域代表の田辺先生の強力なリーダーシップのもと、各計画研究代表、分担者各位がそれぞれ熱心に取り組んでくださった結果と感謝いたします。

このような研究成果をいろんな分野で広く利用していただけるように、ホームページ (<http://tritium.nifs.ac.jp/>) 上でも積極的に情報発信することを心がけたいと考えています。

20年度も関係各位のご支援とご協力をよろしくお願いいたします。

特定領域「核融合トリチウム」事務局
核融合科学研究所 安全管理センター
朝倉 大和