

平成 21 年 3 月 9 日

特定領域「核融合トリチウム」協力研究者各位

第 3 回公開シンポジウム「核融合炉実現を目指したトリチウム研究の新展開」、同成果報告会
(3 月 5,6 日開催)ご出席御礼と総括

領域代表 田辺哲朗

年度末のお忙しい中、2 日間に渡りご発表、ご討論ありがとうございました。お陰様で有意義にシンポジウム・報告会を開催することができました。発表が多数で、議論の時間が不足気味になってしまったことをお詫び申し上げます。また、他の会合との重複があったりして、総合討論は十分にできてはおりません。ご出席の皆様、それぞれにご意見をお持ちのこと存じます。当日いただけなかったご意見やコメントを、田辺または朝倉様までお寄せ下さい。ちなみに、添付は、総合討論の際に用いた田辺の個人的な総括です。発表の真意を十分にくみ取れていない部分もあるかと思いますが、さらなる研究の進展のため、あえて皆様に配布させていただきます。是非、一度お目通しをお願いいたします。また、ご意見、コメント等いただけますようお願い申し上げます。

個々の成果発表は、素晴らしいものだったと思います。しかし、西川、田中両先生がご指摘されましたように、領域全体として、また同時に個々の研究者が、核融合炉実現にどう関わっていくのか、あるいは核融合炉実現をどう主導していくのかが、今後の最大の課題として浮き上がってきました。このためには、まずは、皆様に、冒頭で申し上げました、トリチウム経済、トリチウム安全、水素同位体としてのトリチウムに関しての共通認識を持っていただくことが肝要かと思われます。

田中先生からは、研究の 2 面性、すなわち核融合炉実現のための技術あるいは工学開発、および学術性の発揮、に正面から取り組むべきであり、トリチウムはその格好のターゲットであるとのご指摘を受けました。学術として発展させて行くためには、過去のデータや成果をきちんと取り上げるべきであることも指摘されました。学術に裏打ちされた工学でなければ、単なる経験にすぎません。また経験を体系化して学術にしないと後生には伝わりません。本領域設定により、素晴らしい成果をあげることはもちろんですが、領域設定期間が終了した後に、引き続きあるいはそれ以上の研究のアクティビティーが発揮されるようにしなければなりません。このためには、学術面で後生に残る成果も問われます。

来年度は、4 年目、5 年目への継続の為中間評価を受けねばなりません。また申請書も新たにしなければなりません。達成目標および未達目標の明確化と新規または目標の修正の掲示が必須です。添付の総括が、今後の研究の進展に役立てば幸いです。

別添にて、今後の予定を再掲しております。中間評価に向けた、報告会・討論会を 8 月 28,29 日(金、土)に中部地区で開催予定です。議論を中心にした、徹底討論会としたいと思っております。ご出席のご準備をお願いいたします。



今後の予定（全体行事および書類作成、総括班で議論したものです）

研究会等

1. 今年度報告書作成（4月中旬）
2. 中間報告会（全体会議：8月28,29日、中部地方 予定）
4. 中間評価のための報告書作成（9月中旬）
合わせて、3年目以降の科研費申請書作成、（同上）
5. プラズマ・核融合学会誌へプロジェクトレビューの投稿（9月号掲載予定）
6. 秋の原子力学会にて、シリーズ講演発表を準備
透過防止膜（とりまとめ、波多野）
トリチウム計測（とりまとめ、山西）
トリチウムシステム、トリチウム滞留（とりまとめ、深田）
有機トリチウム
その他
等々
7. 研究会/シンポジウム
トリチウム燃料の経済性（総括班）
トリチウム安全性（プラ・核専門委員会（主査、林）との共催）
有機トリチウム（含む放射線影響）
8. ICFRMにおいて、サテライトまたは特別セッション企画（波多野）

書類作成

公募、計画研究代表者

1. H20年度（今年度）報告書作成

成果の概要

文科省への実績報告書のコピー（大学へ提出された直後）

購入備品リスト（会計報告書でも可、同）

業績リスト（様式は昨年度の報告書に順ずる。）（遅くとも3月末）

学会発表（国内、国際）、学術誌、特許等

学会発表・学術誌掲載論文のコピー（pdf）（遅くとも3月末）

計画研究代表者のみ

2. 中間評価のための報告書作成（H19年度報告書参照）（9月中旬、原稿は8月末完成目途）

合わせて、3年目以降の科研費申請書作成、（同上）

(3) 各計画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) 他の研究計画との連携状況

(5) 各計画研究の研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）

(6) 各計画研究の成果公表の状況

(8) 計画研究を推進する上での問題点と対応策

(9) 各研究計画の今後の推進方策

3. プラズマ・核融合学会誌へプロジェクトレビューの投稿（9月号掲載予定）

そろそろ執筆を開始していただくこととなります。（6日に詰めたいと思います）

平成20年度の研究成果のまとめ：A02班

A02班研究代表：大宅 薫

核融合炉内のトリチウム蓄積・排出量評価を目的としたコード開発の国内外研究者による連携研究を発展させ、(1)コード間ベンチマークによるモデルの評価、(2)実験データ解析によるコード性能評価・向上、(3)時間空間発展およびセルフコンシステントな評価のためのコードの結合、(4)評価シミュレーションのための素過程データベースの構築を、実験を中心とするA1班とも連携して進めた。本年度は、まず、EDDYコードによる炭化トリチウムのタイルギャップへの再堆積過程とその低減に関する研究、EDDYコードとEROコードとのベンチマークを行った。また、分子動力学シミュレーションによる化学スパッタリングの表面構造依存性など、炉内炭素壁での炭化トリチウムの発生機構の研究が進展した。タングステンについては、水素同位体の原子拡散過程を明らかにするため分子動力学シミュレーション研究を行い、また、水素同位体のリテンション量の照射量依存性と温度依存性の観測データをACAT-DIFFUSEコードによる計算と比較した。さらに、水素リサイクリング素過程の表面電子移行計算へのACATコードによる粒子反射過程の導入や、欠陥形成エネルギーの第一原理計算と統計力学モデルによる原子空孔による水素原子の多重捕獲の研究も進んでいる。

核燃焼プラズマ中での微粒子の振る舞いやそのトリチウム蓄積挙動を明らかにするため、背景プラズマとして実トカマク形状のコアプラズマとSOL/Divertorプラズマの準備が進み、B2-EIRENEコード計算によるHL-2AトカマクのSOL/Divertorプラズマを用いて微粒子の運動を解析した。また、ダイバータ総合コードSONICはコアプラズマコードとの統合化に向けたモジュール化を行うと共に、EDDYコードとの結合を進め、炭化水素の主プラズマへの混入過程を調べた。先進粒子コードPARASOLによるシミュレーションは、C-MOD実験のプラズマ流を再現するとともに、SOLプラズマ流構造形成において捕捉イオンのバナナ運動効果を見いだした。IMPGYROコードは、昨年度完了したEDDYコードの結合に続き、今年度さらに背景プラズマコードSOLPSとの結合を進めると共に、JT-60U装置のタングステン堆積分布の解析をA1班との連携の下に進めている。

公募研究では、プラズマ中の炭化トリチウム挙動を研究するため、EDDYコードを用いてダイバータ板近傍のCD、C₂発光分布のプラズマパラメータ依存性を調べた。また、核燃焼維持のためのD/T比の制御を主眼として、炉心プラズマ中のトリチウムやタングステン不純物挙動を解析した。

これら成果の詳細はそれぞれの資料を参照されたい。

平成20年度の研究成果のまとめ：B01班

B01班研究代表：深田 智

特定領域計画研究B1班は、核融合炉固体あるいは液体ブランケット材中のトリチウム移動解明と新規回収プロセス開発の研究をおこなうため組織されている。2008年度において、固体ブランケット関連において、JAEA 関、榎枝らは ITER テストブランケットモジュール内の熱と物質輸送を明らかにするため、ペブル充填材を詰めた状態で X 線 CT 撮影等で微細な充填材構造を可視するとともに、熱流体計算をおこない、従来にはない精度でブランケット特性を明らかにした。九大の片山、西川らは、固体ブランケット材とガス、水蒸気との吸着、反応の相互作用を数値モデル化した計算と、トリチウム放出実験結果を比較し、良好な一致を示した。また固体ブランケットヘリウムスウィープガスからのトリチウム回収と漏洩の予測のため、F82H フェライト鋼の水素透過と水蒸気の透過への影響を実験的に求め、ITER 条件でのトリチウム漏洩と回収条件を定量的に求めた。また JAEA の河村らは、新規ブランケット回収システムとして、プロトン導伝性セラミックによるトリチウム回収実験を実験し、物質移動係数の速度定数を使って解析した。結果はおおむね一致したが、電圧付加により透過回収した水素がセラミック不定比性反応で一部水蒸気になるとともに、 H_2O -HTO 同位体交換反応の影響が現れた。今後の詳細な検討が必要と考えられる。

液体ブランケットにおいては、九大の深田らが Li-Pb 共融合金における H_2 -D₂ の溶解度と拡散係数を透過法で測定し、同位体効果を明らかにした。Li-Pb 成分比の違いによる Li 活量係数の変化も求めた。Li ブランケットに関しては、Li からの Y 金属による水素同位体回収率と回収量を重量法で直接測定し、Y の HF 処理の効果を明らかにした。深田と NIFS 相良は、Flibe ブランケット材の水素同位体の溶解と拡散挙動についてこれまでのデータを整理し、分子径の寄与や H_2 -HF 化学形の違いの効果を明らかにし、論文等で発表した。また FFHR-2 概念設計を進歩させ、より現実味のあるブランケット設計に進めた。

当 B1 班は最終的に、核融合炉トリチウム自己充足と安全性確保の観点から、ブランケットからのトリチウム回収の達成目標を 99.9%とし、これまでの工学の常識を超える回収率達成とトリチウム透過防止法の技術達成を目標にしている。各ブランケット材料とトリチウム間の物性値をほぼ取り終えた現在、さらに来年度ブランケットシステムを念頭において、高い回収と透過防止の技術的工学的達成に向かって進みたいと考えている。

平成20年度の研究成果のまとめ：C01班

C01班研究代表：山西敏彦

C01班の研究活動は、核融合真空容器内でのトリチウム挙動及びブランケットでのトリチウム挙動を研究するA班及びB班の研究結果（静的及び動的トリチウム滞留・放出量とその化学形）を受け、その外回りとなる燃料循環系等でのトリチウム挙動の解明を目的とするものである。燃料注入系と環境とのインターフェイスをなす箇所両方を有し、そのトリチウム濃度差は12桁と極めて範囲が広いことが最大の特徴であり、この濃度範囲のトリチウムを閉じこめるという重要な目的を果たすことが要求されている。

燃料としてのトリチウム処理については、ITERを目指した研究開発及びITERの運転によって確立していく課題も多いと考えられる。一方、原型炉以降までを見通した場合、長時間運転に伴う、冷却系（真空容器内及び2次冷却系）へのトリチウム漏洩とそのトリチウムの回収、高濃度トリチウムに長時間曝される状況下でのトリチウムの閉じこめが解決すべき最大の課題である。つまり、高濃度トリチウムが（特に複雑な挙動を示すと考えられる水及び有機の化学形のトリチウム）材料に与える影響と、冷却水系という低濃度大量のトリチウム水処理、という一見相反する課題を同時に解決しなければならない。

上記C01班の目標に従い、高濃度トリチウム水の金属に対する腐食に関する予備実験結果が、原子力機構から報告された。現在まだトリチウムの特異性が認められていないが、今後のより高濃度での実験での成果が期待される。有機材料とトリチウム水の相互作用の観点についても、原子力機構から線及びベータ線による耐放射線耐久性の模擬試験結果が報告され、線質の影響に関する議論が行われた。富山大においては、有機材料中のトリチウム透過速度を測定する実験が着実に途についたことが報告され、原子力機構からは、金属中のトリチウム水蒸気透過速度に対する興味深い結果が報告された。低濃度大量トリチウム水処理に関しては、名大から、液相化学交換塔の初めての系統だった基礎分離データが報告された。トリチウム分離性能データ取得に向けた研究活動、解析研究の進展も報告され、今後の展開が大いに期待される。原子力機構からは、吸着塔による圧カスイング水同位体分離を目指す基礎研究が報告され、吸着剤のシリカアルミナ比、カチオンの種類が、水蒸気吸着特性に与える新たな結果が示された。静岡大からは、金属酸化膜が、トリチウムの透過等挙動に与える影響が報告され、実験手法、結果解釈についての活発な議論を引き出すことができた。

C01班の科研費特定領域研究は2年目にはいり、トリチウム実験の困難性等から、まだ実験を開始したばかりの課題も多いが、今後の進展を充分期待できる状況となったことを報告すると共に、班メンバーの今後の一層の活発な活動を期待したい。

C02班の工学面における目標は、(1)核融合炉高温配管から透過漏洩するトリチウム量を1/1000以下に抑制する技術を開発する、(2)汚染材料からのトリチウム脱離挙動を把握すると共に、その知見を活かして除染技術を開発する、の2点である。トリチウムの透過や汚染材料からの脱離は、いずれも材料中のトリチウムの拡散、表面被覆層（自然酸化膜や透過障壁膜）中の移行、表面での再結合反応や同位体交換反応を伴う現象である。そこで、上述の工学的目標を達成するため、基礎科学的な立場から材料バルク中および表面層における水素同位体の微視的存在状態を調べると共に、微視的状态とマクロ挙動をつなぐ理論モデルの構築を進めている。

透過漏洩の抑制についての研究は計画研究として進められており、今年度は透過障壁としてのAu膜とZrO₂系酸化物膜の特性を評価した。実用段階では複雑構造物表面に障壁膜を形成する必要があるため、成膜方法を比較的実用化しやすい湿式法に限定し、前者についてはめっき法、後者についてはゾルゲル法を主に用いた。フェライト鋼上に厚さ10 μmのAu層を成膜したところ、水冷却ブランケットの想定温度である300において1/1000程度の透過抑制効果が得られた。これは、Au中の水素同位体溶解度がフェライト鋼中に比べ著しく低いためだと考えられる。ただし、より高い温度領域では透過抑制効果は減少した。一方、ゾルゲル法で成膜した厚さ約50 nmのZrO₂層は、比較的小さな透過抑制効果しか示さなかった。膜中の亀裂や開気孔が水素同位体の透過経路となっていると考え、ZrO₂層の上にさらに厚さ約150 nmの被覆層を形成させたところ、大きな透過抑制効果が発現した。すなわち、透過速度はフェライト鋼の使用上限温度である550においても1/2000に減少し、温度の低下と共に透過抑制効果はさらに増大した。以上のように、実験室レベルでは透過漏洩量を1/1000以下に抑制する見通しが得られつつあり、今後、さらなる性能向上を目指して被覆層の構造解析や透過機構の解明を進めると共に、核融合炉高温配管における汎用的な透過抑制処理法の確立を想定して耐久性など実機への適用性を慎重に検討する予定である。

除染技術については計画研究と公募研究で連携しながら進めており、今年度はトリチウムの一次閉じ込め材料であるオーステナイト系ステンレス鋼を中心とする金属材料(計画研究および公募研究)および環境との境界となるコンクリート(公募研究)について検討した。オーステナイト系ステンレス鋼については、室温から300、大気中から真空中(10⁻⁶ Pa)という極めて広い温度・圧力(水蒸気分圧)範囲において、トリチウムの脱離が拡散律速モデルで記述できることが見出され、除染処理中および廃棄物保管中のトリチウム脱離挙動を予測する見通しが得られた。また、オーステナイト系ステンレス鋼およびFeやCuなど水素同位体が吸熱的に溶解する純金属において、表面酸化膜近傍に高濃度にトリチウムが捕獲されることがわかった。このような表面トリチウム捕獲層の形成は、脱離トリチウムの化学形に影響を及ぼすと共に、2次汚染の引き金となる可能性がある。そこでまず、表面捕獲層からのトリチウム移行速度を支配する因子として、表面層における捕獲エネルギーを評価するための予備的検討を行った。今後、捕獲エネルギーの見積り精度を高めると共に、後述する分析手法を駆使して表面層中のトリチウムの存在状態を調べ、捕獲メカニズムを明らかにする予定である。炉心プラズマに直接対向する、いわゆるプラズマ対向材料については、トリチウムが導入される際の条件が除染特性に及ぼす影響に着目した。すなわち、タングステンに重水素イオンと炉心プラズマ中の不純物を模擬した炭素イオンをいくつかの異なる手順で照射し、真空加熱法による除染を試みた。まず単独で炭素のみを照射したのち重

水素を照射した場合には、重水素の脱離に 900 K 以上の温度での加熱が必要であったが、炭素と重水素を同時に照射した場合には、700 K 以下の温度で除染が完了した。この結果は、炉心での環境が除染特性に大きな影響を及ぼすことを示唆する興味深い結果であり、今後 A01 班とも連携して水素同位体の捕獲状態に関する分析を進めると共に、他の除染方法についても検討する予定である。加えて、プラズマ対向材料からのトリチウム脱離を実機（核融合科学研究所 大型ヘリカル装置 LHD）で評価するための、水素同位体モニタやトリチウム水の連続回収設備についての検討を行った。一方コンクリートについては、構成成分のうちセメントが最も多くのトリチウムを吸蔵すること、脱離するトリチウムの大部分は水蒸気状(HTO)であるが、高温で脱離させると微量有機物状トリチウムが発生することなどがわかった。

以上のマクロ挙動についての研究と並行し、トリチウムの微視的存在状態を調べるためラマン分光装置と赤外分光装置を東京大学および日本原子力研究開発機構にそれぞれ整備し、酸化物およびコンクリートについての分析を開始した。また、微視的存在状態とマクロ挙動との関連を明らかにし、かつ新規材料中のトリチウム挙動を予測するため、量子力学計算・分子動力学計算・モンテカルロ法によるマルチスケールモデルの構築も進めた。本年度は特に密度汎関数理論に基づく量子力学計算の結果を利用した拡散モデルの構築に重点を置き、フェライト鋼をはじめとする体心立方晶金属について、結晶格子中の水素同位体の電子状態および振動状態から、拡散における同位体効果、添加元素の効果、結晶中の歪の効果等を予測する見通しを得た。加えて、材料中のトリチウム濃度をイメージングプレート (IP) による線誘起 X 線測定で評価する手法の開発が公募研究として進められている。IP は受動型積算線量計の一種であり、その輝尽性発光強度より材料中のトリチウム濃度を求めるには、広いダイナミックレンジを確保すると共に、フェーディング特性を把握する必要がある。加えて、X 線スペクトルは材料の種類のみならずトリチウムの内部分布にも依存するため、IP 感度のエネルギー依存性を知る必要がある。今年度は、広いダイナミックレンジを確保するための光学系を開発すると共に、フェーディング関数を作成した。また限られた領域ではあるが、シンクロトロンを用いて IP 感度のエネルギー依存性を測定した。今後、さらに詳細に IP 感度のエネルギー依存性を評価すると共に、実際にトリチウム濃度測定を行う予定である。