

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	権 セロム
論文題目	Study on tritium production property by D-T and D-D neutrons of LiPb blanket for fusion reactor (核融合炉 LiPb ブランケットの D-T および D-D 中性子によるトリチウム生成に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、中性子輸送計算によって、核融合炉の液体 LiPb ブランケットのトリチウム製造能力を、D-T および D-D 中性子に対してモンテカルロ法を用いて評価し、そのトリチウムの増殖性能として必須である実効的増殖率が 1 を超えることの技術的成立性を、特に核融合エネルギー利用の実現に不可欠な燃料自給について考察したもので、全 5 章よりなる。</p> <p>第 1 章は序論で、エネルギー源としての核融合の成立性について、天然資源として存在しないトリチウムの自己充足性、特に D-T 核融合反応の結果生成する増殖ブランケットの機能を考察し、単に定常運転においてトリチウム増殖比(TBR)が 1 以上であるのみではなく、そのために使用するリチウム 6 の同位体濃縮にかかる燃料制約、また初期装荷用トリチウムの制約が、エネルギー供給システムとしての特性に大きく影響しうることを問題点として抽出した。さらに核分裂原子力との比較において、中性子輸送特性がこれらのトリチウム増殖性能を通じて核融合炉の成立性に決定的であり、原子炉設計における臨界集合体を用いた臨界実験に相当する積分実験を通じたニュートロニクス解析の検証が不可欠であること、そのための施設が世界的に極めて限られていることを指摘した。また、既往研究と世界的な研究開発の現状を概観して、数多くの核融合炉設計、ブランケット性能評価においても燃料自給性能と制約の問題から核融合中性子工学を論じた研究が存在しないことを確認した。これらから、トリチウム燃料制約の評価と中性子輸送特性解析、燃料システムの特性評価およびその検証法を通じた、一連の技術的課題を本論文の主要目的として定義した。</p> <p>第 2 章では、近未来に可能な核融合炉ブランケットとして LiPb 液体金属増殖方式を選択し、その現実的な構造として構造材、第一壁、後壁反射材、ならびに遮蔽体を含む中性子輸送特性をモンテカルロ計算コード MCNP-5 と核データライブラリ FENDL を用いて解析した結果をまとめ、ブランケット構造を最適化した結果を示した。特に、最適化した構造において、超電導コイルの健全性を維持できる遮蔽能力とトリチウム増殖性能(TBR)が現実的な第一壁や反射材材料の組み合わせで可能であることを明らかにし、またそれを可能とする設計範囲を示した。さらに、中性子増倍材としてベリリウム金属を適当に配置することによって、従来可能と考えられていなかった、天然組成リチウムを用いた LiPb 増殖材によって総合 TBR>1 となることを見出した。この結果、現在世界的にリチウム同位体濃縮が商業的に実施されていないことを考慮しても、それが核融合エネルギーの実用化を妨げる本質的制約とならないことを指摘した。</p> <p>第 3 章では、この具体的なブランケット構造とトリチウム増殖性能のニュートロニクス解析の結果を踏まえ、また一方、システムダイナミクスコード STELLA を用いて核融合燃料循環系をモデル化して、プラント全体でのトリチウム燃料増殖性能を解析した。特に、初期核融合炉で問題となる初期装荷トリチウムの入手可能性について、D-D プラズマ運転によって少量トリチウムを自己生産しつつ、さらに D-D</p>			

中性子及び発生したトリチウムを循環しての D-T 中性子からトリチウムを増殖することによって D-T 通常運転に至る「D-D 起動シナリオ」が現実的な運転期間内で可能であることを明らかにした。すなわち生成されるトリチウムがプラント各所に蓄積され、さまざまな作用により吸蔵される一方、最終的には指数関数的な増加を開始し、D-T 同量のプラズマ燃焼による定格運転に至る過程をシステムダイナミクス手法を用いた解析により記述した。また、この過程におけるプラント内のトリチウムインベントリ仮定が起動期間に及ぼす影響、少量初期装荷トリチウムによる起動期間の短縮効果を示すとともに、TBR への依存性の影響が比較的小さいことを示した。これらの結果から、初期装荷用トリチウムが世界的に存在しないことが核融合エネルギーの本質的制約とならないことを見出した。

第4章では、ここまでで評価した D-D 反応中性子による中性子輸送解析の結果に基づき、D-D 中性子を用いた積分実験による総合的なトリチウム増殖性能の検証方法を提案し、その実現可能性を評価した。世界では D-T 反応を用いた中性子源が2基しか存在せず、多くのニュートロニクス解析が実験的検証を必要とする一方、その機会が現状では ITER におけるテストブランケットモジュール試験しかないことを指摘し、より簡便な中性子源として重水素イオン源による測定が可能であることを示した。すなわち小型ブランケットモジュールの表面にチタン金属等をコーティングし、それを重水素化して 10~100keV エネルギー領域の重水素ビームで照射することにより、発生する中性子がモジュール内に計量可能なトリチウムを生成することで、中性子輸送計算が実験的にベンチマークできることを明らかにした。またブランケット構成材料の D-T 中性子と D-D 中性子に対する中性子増倍効果の差を論じて、D-D 中性子による D-T ニュートロニクス評価の有効性と限界を見出した。D-D 中性子は D-T 中性子よりエネルギーが低く、高い閾値エネルギーを持つ中性子増倍反応やリチウム7によるトリチウム生成反応の寄与が実測困難となる。さらに同様な手法により、現存および近い将来の D-D プラズマ実験装置を体積中性子源として利用することでブランケットモジュールのトリチウム増殖性能が実験的に確認できることを明らかにし、以て前章で提案した D-D 運転による初期装荷トリチウムなしでの起動シナリオの評価法を提案した。

第5章はまとめと結論であり、本研究で見出した D-T 中性子と D-D 中性子のトリチウム増殖性能のニュートロニクス評価を通じて、核融合炉ブランケットにおける燃料自己充足性を総合的に評価しまとめている。すなわち、リチウム6同位体分離技術や初期装荷用トリチウムの世界的な不足が、核融合をエネルギー源として利用する場合の本質的な制約とならないような方策を示し、その実現性を明らかにしている。またこれらの中性子輸送の解析で不可欠な積分実験による検証の重要性から、それらを可能とする D-D 中性子による実験的評価の意義とその可能性を論じ、今後の核融合炉設計と炉工学の研究開発戦略において、プラント全体でトリチウム自己充足性を高い確度で確認することが、原型炉以降を目指す場合の重要な要件となることを結論し、そのために本研究で明らかになった知見を利用することが有効であることを述べている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、核融合炉ブランケットとして液体リチウム鉛合金(LiPb)を用いたシステムを対象としてトリチウム燃料の自給可能性に着目し、中性子輸送計算によってブランケットの構成を検討する一方、システムダイナミクスモデルにより燃料システムの特性から初期装荷トリチウムの自給可能性を論じ、さらにそれらの結果を現存する重水素イオン源を用いて検証する積分実験の可能性を示唆する、一連の研究結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) 中性子輸送コード MCNP を用いたニュートロニクス計算により、モデル化した LiPb ブランケットモジュールのトリチウム製造能力(TBR)を評価し、フルトーラスに拡張したときに十分トリチウムを自給できる構造と材料の組み合わせを見出した。さらに、リチウム同位体濃縮の効果、ベリリウム中性子増倍材の効果の評価して、天然組成リチウムでも燃料自給が可能であることを指摘し、また適当に反射材を配置することで中性子が有効利用でき、従来可能であると考えられていなかった同位体濃縮なしで $TBR > 1$ となることを示した。

(2) 初期装荷用トリチウムを、D-D 運転で増殖ブランケットと D-D 反応を用いて自己生産し、D-T 通常運転に至るシナリオを、現実的ブランケット構造のニュートロニクス解析と燃料サイクルのシステムダイナミクスモデルで検証した。その結果、D-T 通常に至るまでの期間をブランケットの TBR、核融合炉のトリチウムインベントリーの関数として求め、合理的な運転期間で起動可能であることを示した。また、少量のトリチウムによってこの起動期間が著しく短縮できることを明らかにした。

(3) 新たに重水素加速器を用いた簡便な D-D 中性子発生による積分実験法を提案し、その実現可能性を明らかにした。この結果、従来考えられていたよりはるかに容易に積分実験でブランケット体系のトリチウム増殖性能が評価できることを見出し、それによって前記初期装荷トリチウム生成シナリオも検証可能であることを明らかにした。

以上、本論文は核融合のエネルギー源としての成立性について不可欠である、増殖ブランケットによる定格運転でのトリチウムの自給、リチウム6濃縮を必要としない天然リチウムによる液体 LiPb ブランケットの成立性、および D-D プラズマ運転による初期装荷トリチウムの自給可能性を中性子輸送計算によって示し、さらにその検証のための積分実験を、従来構想されたことのない、比較的簡便な重水素イオン源により実施する方法を提案している。この成果はその方法論と知見を通じて核融合工学とエネルギー科学に大きく貢献するものであり、得られた結果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成26年2月21日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 平成 年 月 日以降