

プログラム名：核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化

PM名：藤田 玲子

プロジェクト名：核反応データ取得及び新核反応制御法

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平 成 2 8 年 度

研究開発課題名：核融合中性子の LLFP の分離・核変換への応用

研究開発機関名：学校法人中部大学 中部大学

研究開発責任者：佐藤 元泰

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

課題1. 体核融合積型(volmetric)中性子照射処理のシミュレーションによる可能性評価

課題2. シミュレーションによる被照射物の実装方法の最適化

課題3. 核融合中性子源の技術的可能性の評価 (27年度はスロッシングイオン発生方法の開発)

課題4. 核融合中性子源のコスト評価

を行った。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

上記課題1及び2は、核融合由来の中性子を照射し、長寿命核廃棄物の短寿命化の可能性を明らかにすることを目的とした。結果は、核融合中性子の照射により、半減期が百万年オーダーのLLFP核種を、約10年程度で安定核に変換できることを理論シミュレーションで示すことができた。課題3及び4によって、この目的を達成するため、核融合中性子源の調査研究を行った。在来からの高温プラズマ核融合方式に代わって、プラズマ・ミュオン核融合という、全く新たな概念を提唱した。この概念に基づいた小型で高密度中性子源の基本設計を開始した。

2-2 成果

1) 核融合中性子による LLFP 処理の可能性評価・照射方法研究の要約

核廃棄物中のLLFPの短寿命化処理に、D TまたはD D核融合中性子を照射する方法を提案し、PHITSコードにもとづき、計算機シミュレーションを行った。総量 10^{20} ヶ/sの核融合中性子を、 $\phi = 10^{19}/5^3 = 2 \times 10^{15}$ n/cm²/sのフラックス密度の照射により、百万年程度の半減期を持つLLFP核種の短寿命化処理が可能であることを明らかにした。半減に必要な照射時間は、約10年程度であり、これは管理可能な時間スケールである。

核融合中性子、加速器の高エネルギー粒子ビームおよび原子炉熱の中性子を、LLFPに照射した場合について、それぞれの特徴と作用機序、不要変換核種の発生を比較した。結果を表1に示す。

高エネルギービームの照射では、1GeVなどの高いエネルギーに於いて、複雑な核崩壊過程をとり、別の放射性核物質を生じる可能性があるが、ビームエネルギーを下げると変換効率が低下する。原子炉では、100～1000eV程度の熱中性子に対して、共振のような挙動による大きな断面積の増大があり、中性子捕獲が大きい。このため、望ましくない新たな核種を生み出す可能性がある。

核融合中性子は、中程度のエネルギー、すなわちDT反応で14.1 MeV、DD反応で2.45MeVであり、高エネルギービーム系の問題を回避し、また原子炉熱中性子よりは高いので、熱中性子捕を回避できる。図1はZr96に対する反応経路の計算例である。開始状態において、単色であるから生成物の反応経路を正確に同定できる。(n, 2n)反応以降では、中性子のエネルギーは主に弾性散乱によって徐々に低下し、その過程で崩壊と中性子捕獲が競合しながら核変換が進行する。非照射物であるLLFPの肉厚を選ぶことによって、エネルギーの低下した中性子を外部に取り出すことによって、熱中性子領域での複雑な捕獲反応過程を回避できる。この様に、他の2つの方法と比較して、核反応の制御性に優れている。

2) 核融合中性子源の検討

表2は、現在までに行われている核融合研究成果を、中性子源の観点から評価したものである。

表2 中性子源としての核融合プラズマ装置の評価

中性子源としての核融合プラズマ装置

	磁気閉じ込め トーラス・ミラー (ITER)	ピンチ プラズマ (GCT-12)	慣性閉じ込め プラズマ (NIF)	中性子源 (IFMIF)
イオン密度 (m^{-3})	10^{18-20}	10^{25-26}	10^{27-30}	—
イオン温度 (keV)	10	1*	10	—
時間スケール	s	~1 μ s	ps~ns	連続パルス
生成・加熱パワ 入力エネルギー等	25 MA 150 MW	2.7 MA 65 kJ/パルス	1.8 MJ/パルス	40 MeV 0.25A 10 MW
核反応	DD	DD	DT	${}^7\text{Li}(d, n){}^8\text{Be}$
中性子発生率	10^{15} n/s	10^{12} n/パルス	10^{15} n/パルス	10^{16} n/s
中性子発生効率 (n/J)	10^7	10^7	10^9	10^9
装置建造費	二兆円	二、三十億円	四千億円	七百億円
中性子 10^{12} 個当たりの 装置建造費	二十億円	二、三十億円	四億円	七百万円

*局所的には数十MeV

 核融合反応断面積原理実証実験に最適
実用には繰り返し回数をあげる必要あり

核融合では、ITERやLHDを始めとするトーラス型磁気閉じ込め核融合装置が最も研究が進んでいる。核融合炉では、ブランケットと呼ばれるプラズマに対向する第1壁上の中性子フラックス密度を $10^{12}/s$ 以下にする。これは、炉壁の中性子照射損傷（核変換）を低く抑えるための処置であり、LLFPの核変換を目指す中性子源とは目的が異なるためである。ミラー型の磁場閉じ込め方式が、高密度の中性子フラックスを得るには適している。プラズマの閉じ込め性能が、トーラスに較べて、劣っているため、熱核融合装置としての成立性に疑問が残る。ピンチプラズマは、構造が単純であり、中性子資源としては最も実現性がある。原理的に連続運転が出来ないので、高繰り返し運転、準定常であるレシプロ運転方法の開発が必要になる。原理実証は、単パルス運転でも可能である。IFMIFは元来、核融合炉壁の中性子照射試験装置であり、中性子源としては可能性が高い。

3) プラズマ・ミュオン核融合概念の創出

いずれの核融合の方式も、重水素Dまたは三重水素Tの、裸の原子核の二体衝突におけるトンネル効果に基づく核融合反応の成立を期している。このためにプラズマのイオン温度が10 keV以上必要である。エネルギー機関としての核融合炉が成立するには、プラズマを発生させ、10 KeVまで加熱するために投入した電力を上回るエネルギーゲインが必要である。具体的には、プラズマの密度が $10^{20}/m^3$ 以上、プラズマの閉じこめ時間1秒以上が必要であり、これをローソン条件という。

ImPCTは学際研究であり、本件に関して云えば、単なる核融合研究の応用ではなく、高エネルギー科学とプラズマ核融合の連携によって、従来の核融合にも、加速器にも見られなかった新しい発想が求められている。我々は、核融合発電の研究のローソン条件を、高エネルギー核科学の立場から、抜本的に再検討した。

原子核内の核力を、高エネルギービームとの衝突によって解放したときに出るパイオンと呼ばれる素粒子が崩壊して出来るミュオンと呼ばれる素粒子に着目した。ミュオンは、質量が電子の202倍で、電子と同じ荷電を帯びている。ミュオンを取り込んだ原子では、電子の基底準位の軌道半径が通常の原子の1/202になる。28年度には、東北大学の木野との共同研究によって、このミュオン原子と高温プラズマイオンの間の衝突において、図2に示す様に、核融合反応は、裸の原子核（イオン）同士の衝突に較べて、2桁程度低い 0.1~1 keV のエネルギー（温度に換算して二桁程度低い）で成立することを、理論シミュレーション研究によって明らかにした。

加速器科学におけるミュオン原子を、核融合に導入することで、大きなパラダイムシフトが生み出された。核融合反応を起こすためのエネルギー領域が2桁下がったと云うことは、図3に示す様に、従来の核融合において絶対不変の目標であるローソン条件というゴールが代わると云うことである。大幅に位置が変わったゴールポストでは、必要なプラズマパラメータが大幅に緩和される。すなわち、在来の核融合に比較して、①温度が低く、②中性ガス密度が高い、③プラズマの閉じこめ時間は数十 μ s程度で十分である（ミュオンの寿命が2.2 μ sであるため）。

これらのプラズマの条件は、図3に示す核融合の発達段階で云えば、1970年代後半から80年代の段階で、すでに達成されている。29年度には、東北大の木野との共同研究を進め、波の迂断面積に計算精度を向上させ、さらに、ミュオン原子の生成速度に関するシミュレーションをおこない、プラズマ・ミュオン核融合の概念を完成させる。

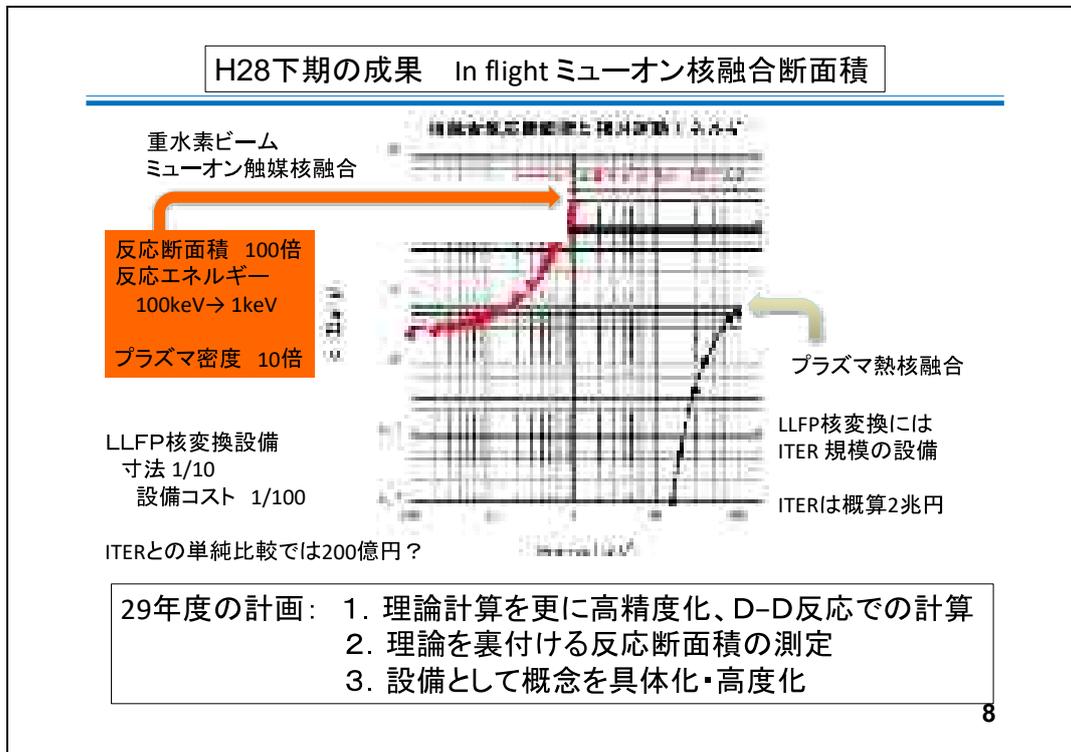


図2 プラズマ (In Flight) ・ミュオン核融合と熱核融合の反応断面積比較

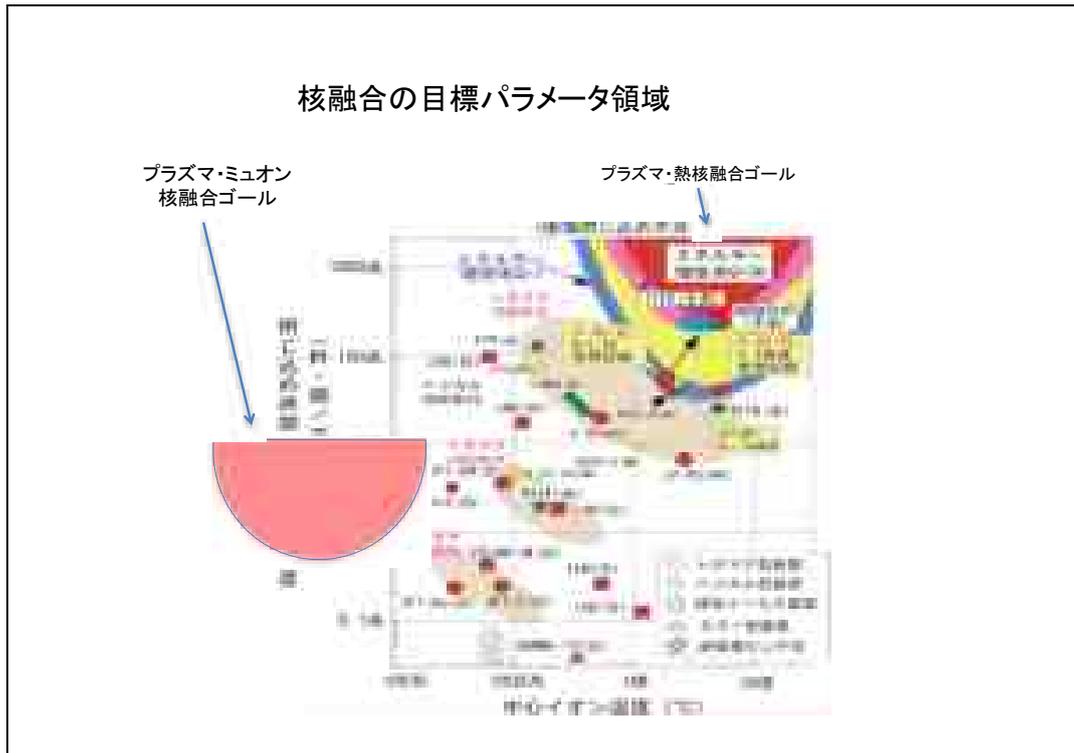


図3 プラズマ・ミュオン核融合と熱核融合の成立領域。プラズマ・ミュオン核融合では、核融合反応断面積の温度に対する領域が2桁低下する。必要な密度は、3桁上昇するが、閉じこめ時間が5～6桁低下するため、図中左側に示す様に目標ゴールが大きく変化する。

2-3 新たな課題など

1) 新たな研究課題1：プラズマの高純度化

あらたに問題となるのは、プラズマの純度である。プラズマ中に電荷数の多いイオン (High Z) 粒子が混入するとミュオンがHigh Z イオンに捕獲されてしまう。このため、従来の核融合では許容されてきたコンタミの防止が求められる。高純度のガス・炉壁・無極放電などにおける新たな課題がある。イオンスパッタなどの工業プロセスプラズマの高純度化に対する知見も必要であろう。液中または高圧ガス中の無極・高周波プラズマの生成、これまでの真空に代わり、液中でプラズマ放電を発生させ、その大きな泡の内部にプラズマを閉じ込める方式の具体的な検討を行う。29年度には、プラズマ境界が高純度のガスまたは液相と力学的に釣り合う構造の基礎計算を行う。高温プラズマ球（または管）と高濃度ガス（または液体）の力学的釣り合い、熱的バランスについて、シミュレーション研究を行う。テニスボール大のプラズマ球が形成できると推算されている。

2) 新たな課題2：高効率ミュオン発生ターゲット開発

高効率なミュオン発生設備の開発が、プラズマ・ミュオン核融合の実現のためには、絶対に必要である。ミュオンを発生させるためのエネルギー効率は、現在、世界最高を誇る阪大のMUSICにおいて、 $10^9/s$ の正ミュオン（エネルギースペクトラム整形前）を発生させるために、0.4kWのビームエネルギーが必要である。単純計算で、 $10^{17}/s$ のミュオンを作るには、40GW必要である。負ミュオンでは更に厳しくなる。高効率化のためには、ミュオン発生に最適化したビーム源の開発が最も

主要な課題となる。29年度には、ミュオン源とプラズマの合体させた新たなレイアウトを開発、合わせて、ターゲット材料の検討を行う。エネルギー利用効率の一桁以上の改善が、プラズマ・ミュオンミュオン核融合の正否を分ける。ImPACTプログラムの各プロジェクトと連携を図り、核融合中性子の核変換への利用に関する革新的スキームの実現を図る。

3. アウトリーチ活動報告

なし