

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：核変換システム評価と要素技術開発

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平 成 2 9 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

27 年度研究で、PHITS コードによる理論シミュレーションの結果、エネルギーが 14.1 MeV の d-t 核融合中性子を照度 $10^{19} \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ で、10 年間照射することで、LLFP の安定化が達成できることを示した。

29 年度は、この目的を達成するため、In Flight Muon Catalysis Fusion (IFMCF) のコンセプトを用いた中性子源を提案した。熱力学的には、ラムジェットエンジン・宇宙ロケットにおけるエネルギー供給を、化学燃焼から核融合反応に置き換えた熱機関の概念である。1940 年代における火力発電ボイラーを原子炉に置き代えた発明に匹敵、又は凌駕する極めて大規模で新しい熱機関の誕生である。このように本研究の成果は、単なる中性子源の範疇を超えて、新しい核融合炉の誕生に繋がる

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

素粒子・素過程物理学の進捗状況は図 1、図 2 に示すとおりである。

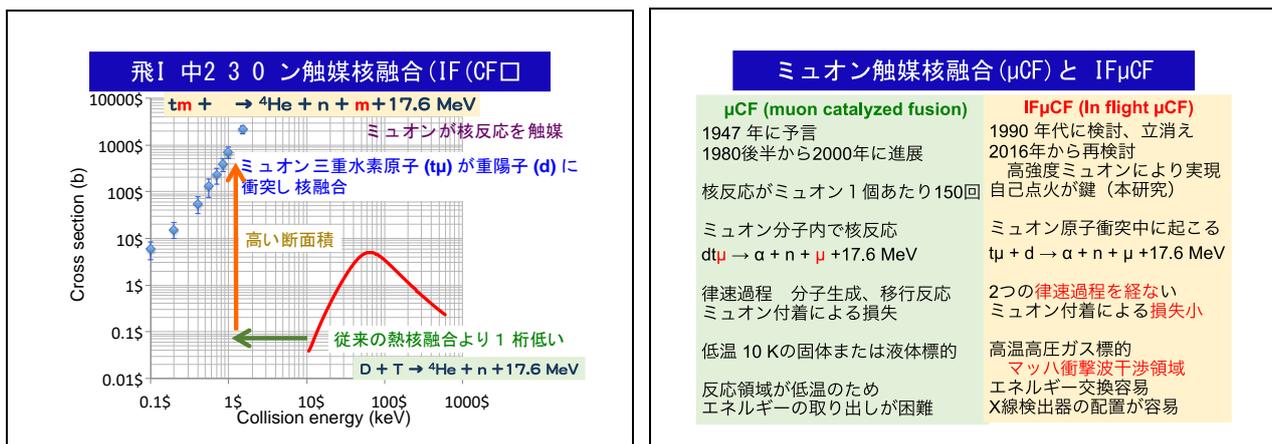


図 1 IFMCF と磁気核融合発生確率とイオンエネルギー 図 2 在来の低温型ミュオン核融合と IFMCF の比較

2-2 成果

1) 学術分野の成果： 木野 (課題番号 2016-PM08-35-01) は、重水素 (d)・負ミュオン (μ^-)・三重水素 (t) から成る 3 体モデルに対する波動関数を、自身が開発したガウス近似法によって解明した。核融合の起こりやすさの指標である核融合反応断面積は 2000 バーンもあり、これは従来の熱核融合断面積 6 バーンの 300 倍もある。その反応に必要な高速イオンのエネルギーは 1.4 keV で、従来の核融合の目標値 10~100 keV に較べて 1~2 桁低い (図 1、図 2) ことを理論的に示した。これは、核融合研究に新しい分野を提示するものである。

2) 工学分野の成果：

ミュオンは物質を貫通しやすい素粒子なので、これを有効に捕らえるには、磁気核融合プラズマに較べて数桁高い密度が必要になる。この高密度という条件は、核融合に関与する荷電粒子の飛程を数ミリ程度に短縮する。すなわち IFMCF は、磁気核融合の薄く (低密度 10^{14}cm^{-3}) 高温のプラズマ (10~20 keV) を広い空間 (数百 m^3) に 1 秒以上閉じ込めると云うローソン条件から脱却し、新しい核融合条件 (New Fusion Criteria) を 5~10 ミリの高圧ガス内の飛程という「空間的条件」に置き換えるものである。LLFP 核変換用の中性子源を基準として解析を進めた。加速器で造られた線量 $10^{16} \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ のミュオンを 30 気圧の高密度 d, t 気体中に入

射すると、ミュオンが3重水素の電子に置き換わり $t\mu$ 原子が生成される。この $t\mu$ に1~2 keV の d (イオン) を衝突させると、核融合反応によって14.1 MeV のエネルギーの中性子と3.5 MeV のアルファ粒子 (ヘリウムの原子核) が放出され、10 keV の負ミュオン (素粒子) が解放される。 d, t 核融合アルファ粒子は、高密度ガス中で電離と弾性衝突によってプラズマを生成し、その d イオンが、次の $d + t\mu$ の核融合反応に寄与する。また、中性子は LLFP の核変換に使われ、最終的に軽水に吸収冷却される。これらの反応に係わる $d + t\mu$ 核融合、ミュオン原子生成、アルファ粒子加熱の飛程は全て数 mm であり、核融合反応は体積約 1cm^3 の内部で完結する。しかし、ガスを小さな容器に詰めてミュオンを入射しても、アルファ粒子の発生する熱による昇温昇圧により容器が破損する。アルファ粒子加熱による d, t ガスの温度上昇を 200°C 程度に留めるには、ガスを流速 2000ms^{-1} (約1マッハ) の流れで交換しなければならない。この問題を解決する為、本研究では、「ラバールノズル」という流れに沿って断面が大きくなるようなラバールノズルという超音速ダクトを用いる構想が生まれた。図3のように、この超音速気流中にくさび形のエッジを置くと「斜め衝撃波」が発生し、その先に急速に密度が高くなるマッハ衝撃波面が生じる。この衝撃波面にミュオンを照射し、核融合を起こす。図4に模式的に示すように、 d, t ガスを整流部-核融合反応部-回収塔・ガス精製機-圧縮機という循環風洞システムに流し、ガスの供給と回収・反応領域の冷却兼エネルギー回収を行う。これは閉鎖系であるから、三重水素などの放射性同位元素を外部に出さない。熱力学的には、炭化水素の燃焼を核融合に置き換えた超音速ラムジェットである。もし、実現できれば、コンパクトな核融合炉を短期間で実現できる可能性が高い。

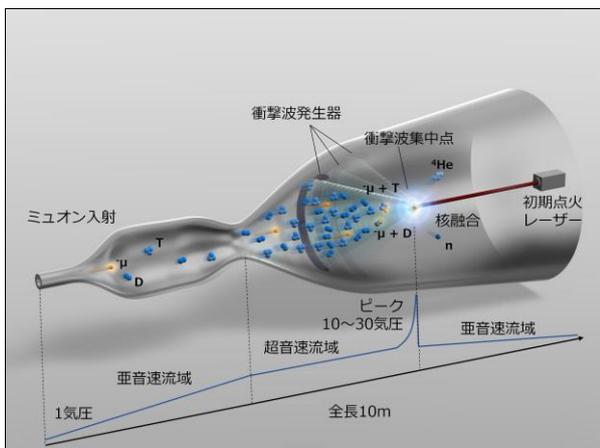


図3 創出した風洞型 IFMCF の新概念

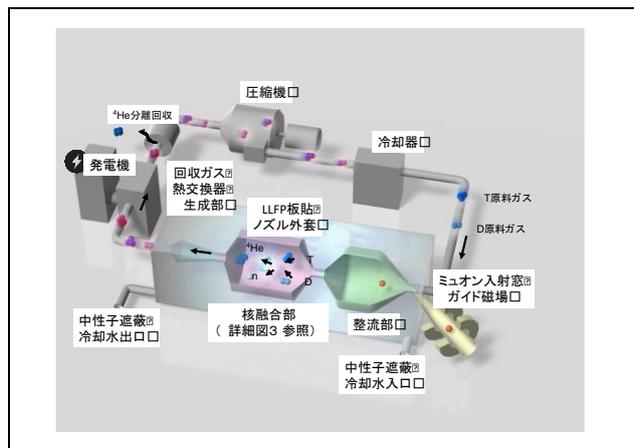


図4 閉鎖系ラムジェット核融合エンジン系統説明図

2-3 新たな課題など

本研究成果は、全く新しい概念の創出であり、日本の総力を挙げた研究開発が求められる。具体的には

- (1) 核融合反応領域におけるアルファ線吸収過程によるイオンの生成・供給に関する研究、
- (2) 核融合イグニッションプロセスの開発 (高密度ガス中に1~2 keV のイオンを供給する方法)、
- (3) 高速循環流からのヘリウム (アルファ粒子) の分離回収方法、
- (4) 核融合によるマッハ衝撃波面への熱入力による擾乱に関する研究開発

等々が IFMCF 実現のために必要な主な研究課題である。

3. アウトリーチ活動報告