

ERITリングをもちいたミュオン触媒核融合炉 MUON CATALYZED FUSION WITH ERIT RING

森 義治[#], 上杉智教, 石 禎浩

Yoshiharu Mori[#], Tomonori Uesugi, Yoshihiro Ishi

Kyoto University, Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science

Abstract

A conceptual design of the muon catalyzed fusion (MuCF) reactor with ERIT (Energy Recovery Internal Target) ring, which is capable to produce negative muons an order of magnitude large intensity compared with the fixed target scheme, is presented. To overcome a limitation of MuCF chain reaction caused by α sticking, a new scheme with RF resonant acceleration is also described.

1. はじめに

MuCF (ミュオン触媒核融合) はその反応が発見されて以来、将来のエネルギー源として注目を集めてきた。

低エネルギーの負ミュオンがDT (重水素-三重水素) 分子に捕獲されると、d-t原子核間距離が電子・負ミュオン質量比 (1/200) に近接する。MuCF反応はこれより自動的に生ずる。また、反応後には、負ミュオンは放出され、次のDT分子に捕獲され、これが繰り返すことで、その寿命の間、連鎖的に反応が持続する。密度の大きな (>500 atm) DT媒質中では1000-2000回の連鎖反応数が期待される。しかしながら、一方で、負ミュオンは核融合で生成された3.5 MeVの α 粒子に捕獲される確率が有意にある。この効果(α 附着効果)により、連鎖反応は150-200回程度に抑えられる (Fig. 1)。

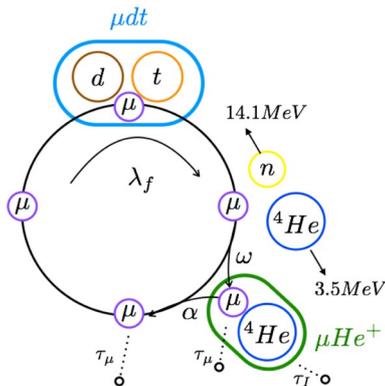
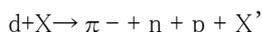


Figure 1: Chain reaction process of MuCF.

しかしながら、その実現にはいくつかの難題を抱えている。一つは負ミュオンのエネルギー効率の良い生成である。負ミュオンは負パイオン崩壊でつくられ、負パイオンは重陽子のようなハドロンと原子核との反応でつくられる。



一般には、核子当たり600 MeV/u-1 GeV/uのビームを固定標的に当てる。パイオン生成には、エネルギー閾値があり固定標的では、入射ビームエネルギーで

300 MeV/u以上が必要となる。したがって固定標的では一つの負パイオンをつくるには、後に述べる標的でのエネルギー損失、パイオンの消失等の効果のために、入射粒子当たり10 GeV程度以上のエネルギーが必要となる。このエネルギーを低減させるには、薄い標的を用い、かつ標的でのエネルギー損失を回復させるエネルギー回復型内部標的貯蔵リングERIT (Energy Recovery Internal Target) ring (Fig. 2) が有効である[1]。

一方核融合反応で生成されるエネルギーは、連鎖反応数が150回とすると、一つの負ミュオンあたり約3 GeVとなる。すなわちブレークイーブン実現には3倍以上足りない。したがって、(1) 負パイオン (負ミュオン) 生成効率を増加させる、(2) α 粒子捕獲を妨げる、ことがブレークイーブン実現のためには必要である。最近著者等により、いずれにおいても解決法が提案されている[2]。本論文は、これらの解決法を含むERIT_MuCFシステムの提案である。

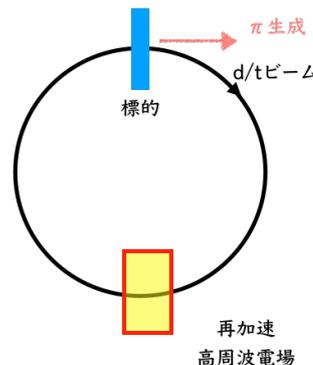


Figure 2: ERIT (Energy Recovery Internal Target) ring.

2. ERIT_MuCF 炉

2.1 基本構成

Reactor は、重陽子 (或いはトリトン) ビームを貯蔵する ERIT リングと負ミュオン生成内部標的 (液体リチウム) 及び、MuCF 反応領域のためにリング中に置かれた DT 分子ガス領域からなる (Fig. 3)。重陽子ビームのエネルギーは、パイオン生成閾値エネルギー (~300 MeV/u) より十分大きい。例えば、1.2 GeV (0.6 GeV/u) がそれ以上である。

標的 DT 分子ガスの密度は MuCF 反応における負ミューオンの連鎖反応を効率良く起こすに十分な 1000 気圧程度であり、領域の長さは約 0.5-1 m 程度である。

DT 分子ガス標的の中では、リングを周回する重陽子 (トリトン) ビームにより負パイオンが生成され、その崩壊により負ミューオンが生成される。

MuCF 反応が効率良く起こるためには、DT 分子が負ミューオンを捕獲してミューオニウム分子 (μDT) が生成されねばならない。そのためには、負ミューオンは 10 keV 程度まで減速される必要がある。負パイオン崩壊とそれに続く負ミューオンの減速を効率良く行わせるために、DT 分子ガス標的はリングを構成する強い磁場 (~ 5 T) を有する電磁石中に設置する。これにより重陽子 (トリトン) ビームによる生成した負パイオンはラーマ-旋回運動により、崩壊に必要な十分な時間で標的中に閉じ込められる。300 MeV/c の負パイオンのラーマ半径はおよそ 0.5 m であり標的長より十分小さく、また、ラーマ周波数は 700 MHz でありパイオンの寿命中の走行距離は 50 m を超える。

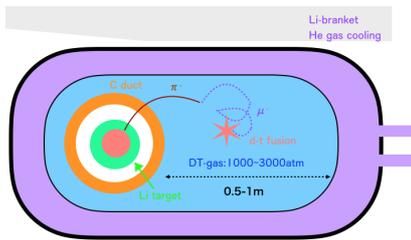


Figure 3: Schematic diagram of ERIT_FFAG MuCF reactor.

したがって、負パイオンのエネルギー損失 ~ 10 MeV/m より、数 100 MeV と大きく、負パイオン崩壊後の負ミューオンは DT 分子に捕獲されるに十分なほど減速する。生成した負ミューオンもサイクロトロン旋回運動により DT 分子ガスとの衝突によりエネルギーを失い、 μDT 分子を形成して MuCF 反応に至る。

2.2 ERIT ring

ERIT リングは、大きな運動量アクセプタンスをもつ必要がある (Fig. 2)。したがって scaling FFAG ラティス構造をもつ FFAG リングが最適である。ERIT リングは、標的との衝突による周回毎のビームエネルギー損失を回復させる高周波加速装置を設ける。これによりイオン化冷却効果によりビームエミッタンス (横方向) の増大を防ぐ。Rutherford 散乱ならびにストラグリングによるエミッタンス増大をイオン化冷却効果で抑止する。FFAG は ERIT 方式には最適のビーム光学を有する。Figure 4 には、重陽子を貯蔵する FFAG_ERIT リングの代表的パラメータ、及びビームエミッタンスの増大の G4BeamLine シミュレーション結果を示す。

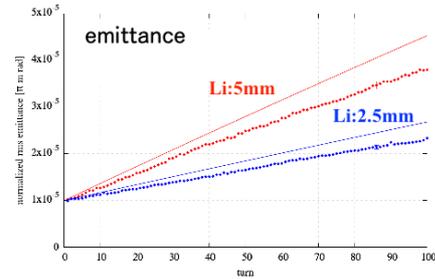
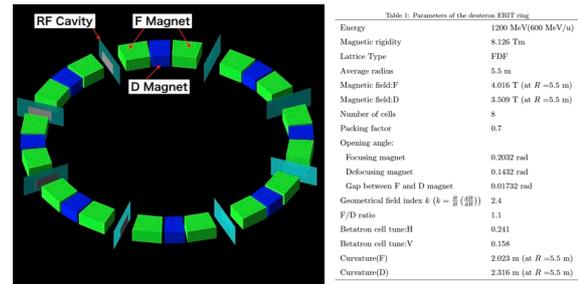


Figure 4: Basic parameters of deuteron (600 MeV/u) FFAG_ERIT ring and beam emittance growth.

2.3 ERIT 方式対固定標的方式: ミューオン生成効率

エネルギー効率負ミューオン生成に必要なビームパワーによって決まる。固定標的では、生成反応断面積が入射粒子のエネルギーに依存するので、標的中のエネルギー損失にしたがって反応効率は低下する。これは次式で与えられる。

$$\eta = 1 - \exp \left[- \int_{E_0}^0 \frac{\sigma(E)n}{S(E)} dE \right] \ll 1.$$

$\sigma(E)$: cross section, $S(E)$: stopping power

ERIT 方式では、原理的には標的でのエネルギー損失はない (常に回復される)。したがって、上式での反応効率は 1 である。一方、ERIT 方式では、周回毎のエネルギー損失を回復させるためのエネルギー補給が必要である。周回毎の損失エネルギーに必要な周回ターン数を掛けたものである。以上より、1 つの負ミューオン生成に必要なエネルギーにおける ERIT 方式と固定標的方式比較は次式であたえられる。また、固定標的のように厚い標的では、生成した負パイオンが Δ 共鳴により中性パイオンになる確率が高い。したがって、負パイオン生成効率において ERIT 方式は、従来の固定標的法に較べて約 10 倍の効率が得られる。

$$\epsilon = \frac{E_o}{E_i} = \Omega_\mu Q \left[\frac{1}{\lambda_f \tau_\mu} + W_0 \right]^{-1} / T_b$$

3. MuCF 反応率の向上

MuCF の連鎖反応数は、 α 捕獲により、1/10 近くに減少する。すなわち、1500 回が 150 回程度に低下。したがって、MuCF によるエネルギー生産は 1 負ミューオンあたり、約 3 GeV となる。①の負ミューオン生成エネルギーが 2-2.5 GeV / 負ミューオンであるから、ERIT 方式をもちいれ

ば物理的ブレークイーブン達成可能である。

しかしながら、MuCF による電気エネルギー生産を目指す、すなわち、工学的ブレークイーブンには届かない。発電まで含む工学的ブレークイーブンには最低でもさらに数倍の効率増加が必要。もし、 α 捕獲効率を数分の一以下に低下させる必要がある。

これに対する一つの答が筆者による案である[3]。

負ミュオンを捕獲した α (ヘリウムイオン) を高周波電場によるサイクロトロン共鳴により再加速して、付着した負ミュオンを剥ぎ取る手法である (Fig. 5)。この手法では、再加速が十分でない (電場強度 > 100 MV/m 以上) と、厚い標的 (~ 100 atm) では、 μ^- ヘリウムイオンがまわりの DT 分子から電子を捕獲して中性化することである。これに対しては DT 標的に粗密をつけることで克服できる。

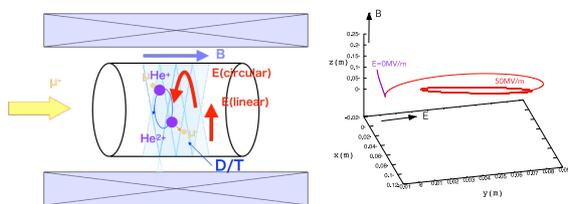


Figure 5: Detachment of negative muons with RF resonant acceleration.

シミュレーションによれば、電場強度 10 MV/m の高周波により負ミュオンの捕獲効率は 3-4 倍に低下できる。Figure 6 に示すように、これにより工学的ブレークイーブン (物理的ブレークイーブンの 3 倍以上) の実現も可能となる。

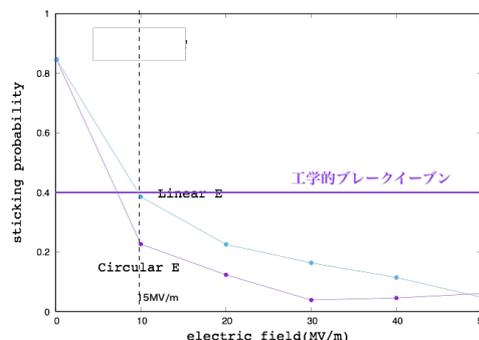


Figure 6: Detachment probability of negative muons as a function of the RF electric field.

4. まとめ

ERIT FFAg リング方式を用いたミュオン触媒核融合炉の提案を行った。ERIT 方式は、薄い標的を用いてエネルギー回復を行うことにより、固定標的法に比し桁上のミュオン生成効率が得られる。また、FFAG リング磁場の境界に標的を設置することで、生成した負パイオン / 負ミュオンは、リング外周に効率良く捕獲・輸送できる。これらにより、物理的ブレークイーブンの達成が可能となる。さらに、ミュオン触媒核融合の連鎖反応 (エネルギー効率) を制限する負ミュオンのヘリウムイオンへの付着 (α sticking) 問題を解決するには高周波電場による共鳴加速法が有効である。これにより、工学的ブレークイーブン (物理的ブレークイーブンの 3 倍以上) も達成可能である。

参考文献

- [1] Y. Mori *et al.*, JPS Conf. Proc. **21**, 011063 (2018). <https://doi.org/10.7566/JPSCP.21.011063>
- [2] H. Okita, Y. Ishi, Y. Mori, Nucl. Instr. Meth., A982 (2020) 1645565. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164565>
- [3] Y. Mori, Prog. Theor. Exp. Phys., 2021, 093G01. <https://doi.org/10.1093/ptep/ptab11>