

2025年4月17日

核融合分野に貢献する加速器の仕様と実現可能性ワークショップ
(MS10奥野プロジェクトキックオフワークショップ)

ミュオン触媒フュージョンからの要望

岡田信二¹✉, 外山裕一¹, 木野康志², 山下琢磨²

¹中部大学, ²東北大学

自己紹介

✉ sokada@fsc.chubu.ac.jp

所属 : 中部大学 理工学部 数理・物理サイエンス学科、ミュオン理工学研究センター 教授
核融合科学研究所 特任教授（クロスアポイントメント）

専門分野 : 原子核・原子物理学... **量子ビーム**を用いた基礎物理学実験、特に **エキゾチック原子の研究**
ミュー粒子（ミュオン）を用いた基礎物理と応用研究、**極低温検出器**を利用した実験研究

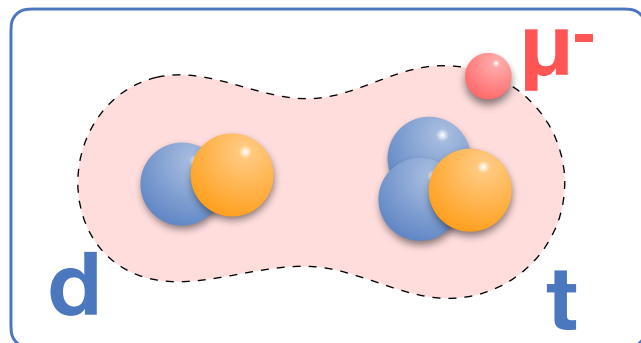
※ 本研究は、NIFS（永岡・菱沼...）、阪大（有川...）、KEK・J-PARC（下村...）、理研・京大加速器実験チーム、世界のミュオン施設に於ける実験グループをはじめとする、幅広い分野の共同研究者との議論をもとに推進しております。今後、連携をさらに広げ、新たな共同研究の輪を築ければと考えています。ご関心のある方はぜひお気軽にお声がけください。

Contents

- ① ミュオン触媒核融合 (μ CF)
- ② ミュオン生成
- ③ μ CFからの加速器への要望
- ④ まとめ

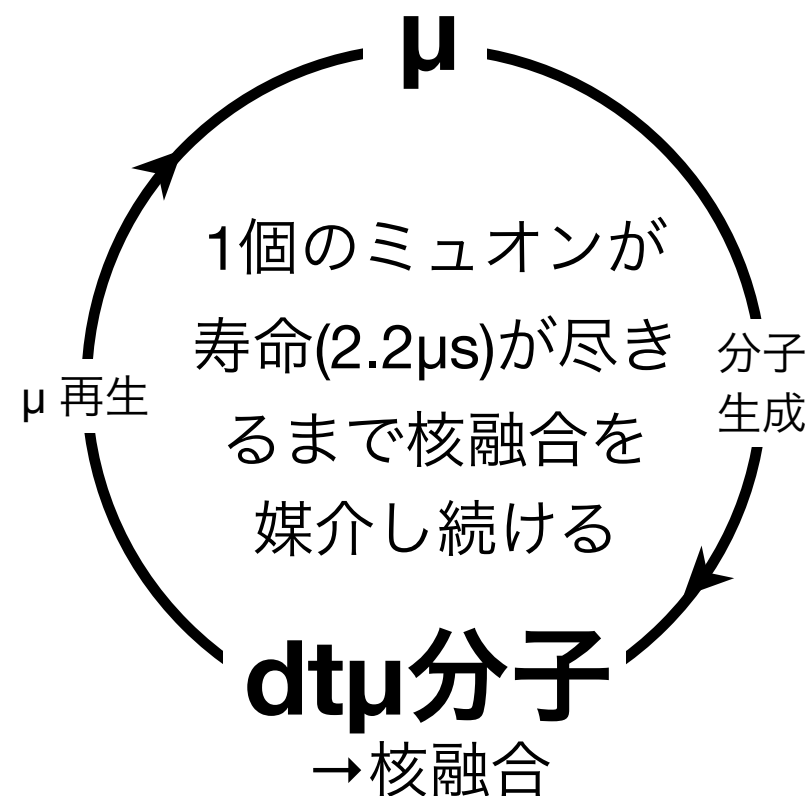
①：ミュオン触媒核融合 (μCF)

革新的核融合方式
「分子内閉込め」

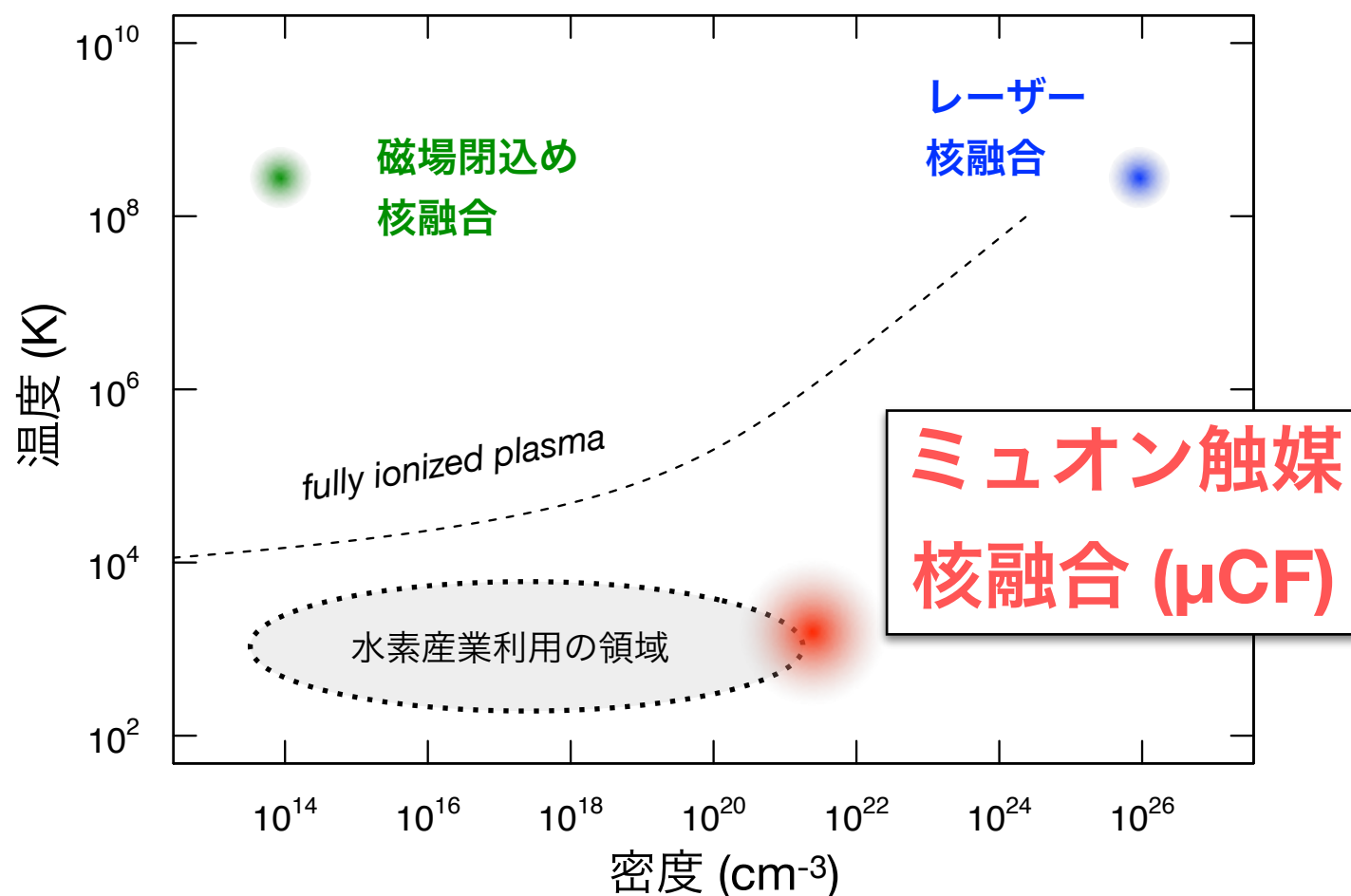


ミュオン分子
サイズ：~500 fm

ミュオンは原子核間の“接着剤”として働き、
D₂分子の約1/200の距離まで原子核を近づけ、
プラズマを使わずに核融合を実現する。



フュージョン方式の比較



μCFサイクル数
(1つのμが起こす核融合回数)

120 ~ 150 回 (現在)

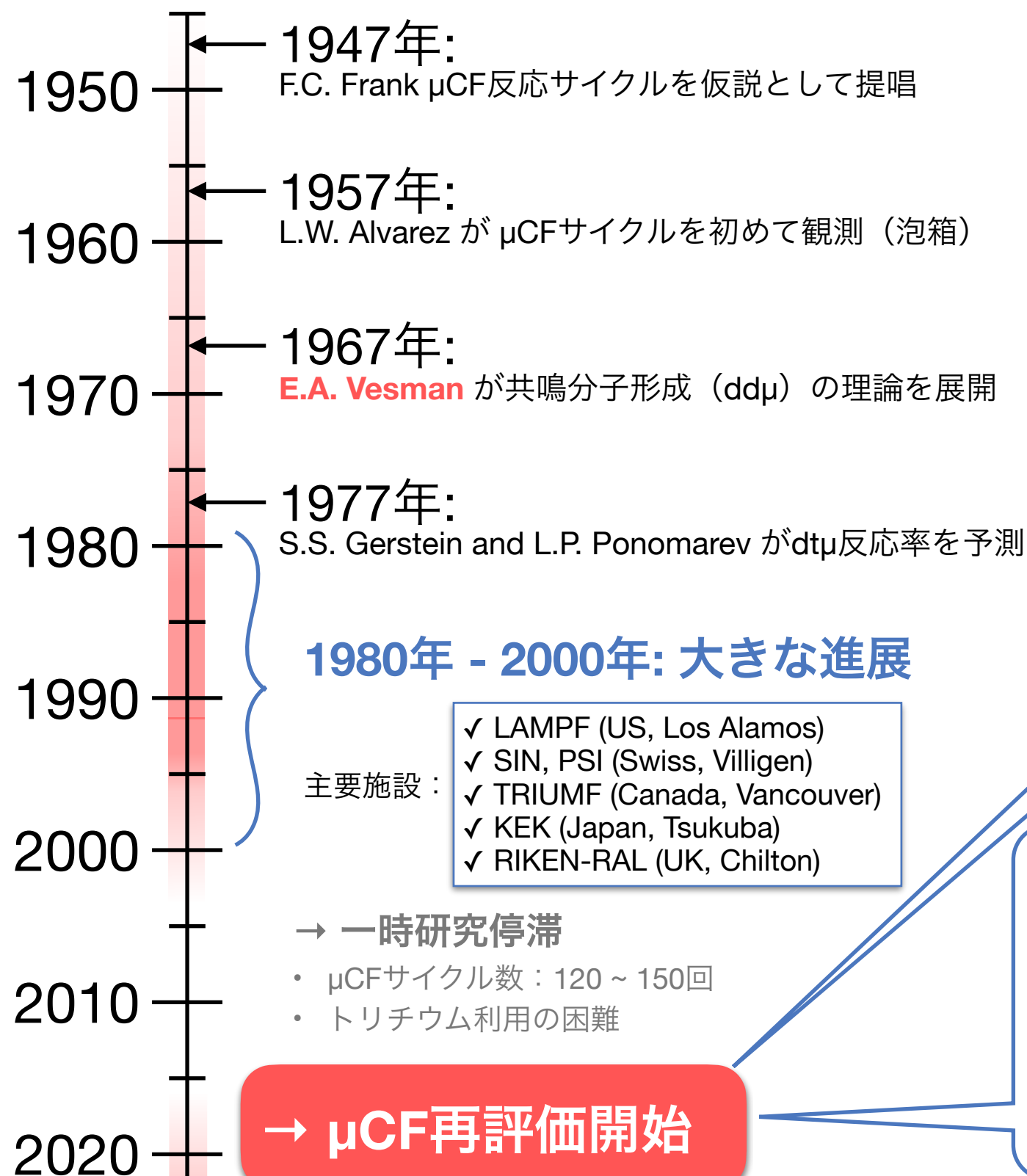
300 回 (科学的breakeven)

1000 回 (経済的breakeven)

→新たなエネルギー源としての道が拓ける

μCF研究の歴史

長い歴史を持つ



2016年～

内閣府：革新的研究開発推進 プログラム「ImPACT」

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: 藤田玲子)

→ プロジェクト 4 (PL: 櫻井博儀)

木野(東北大), 佐藤(中部大), 森(京大) ...

μCFの新たな応用が提案され、
ブレークイーブン未達でも
成立する利用法により、
μCF再評価の機運が高まる

2018年～

文部科学省：科研費 新学術領域研究

「宇宙観測検出器と量子ビームの出会い。新たな応用への架け橋。」 (高橋忠幸)

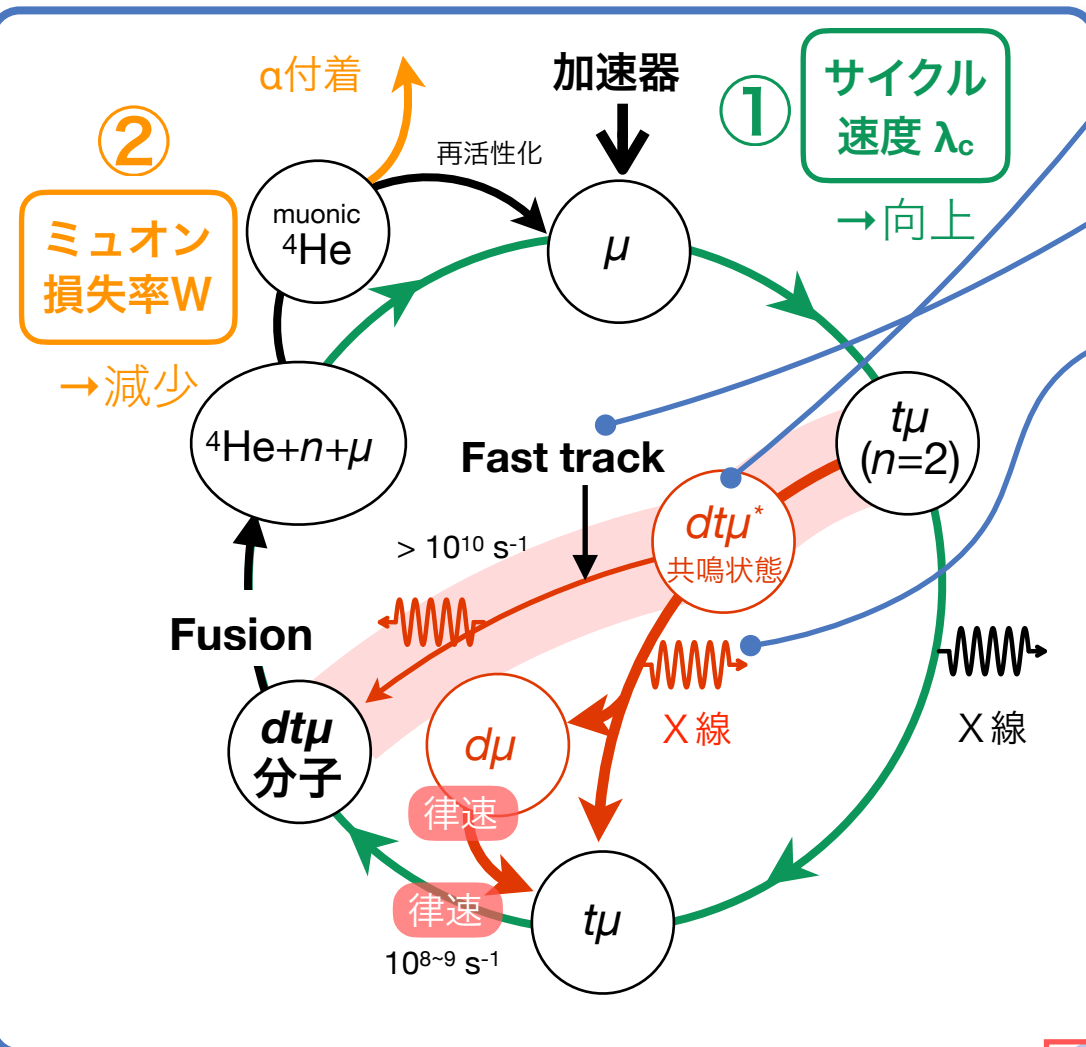
→ 計画研究 B02 「マッハ衝撃波緩衝領域での飛行中ミュオン触媒核融合の創生」 (木野康志)

μCF研究における実験技術
理論計算技術の大きな進展

2025年：ブレークスルー技術 → μCFサイクル数の飛躍的向上を目指す

μCF研究における課題とブレークスルー

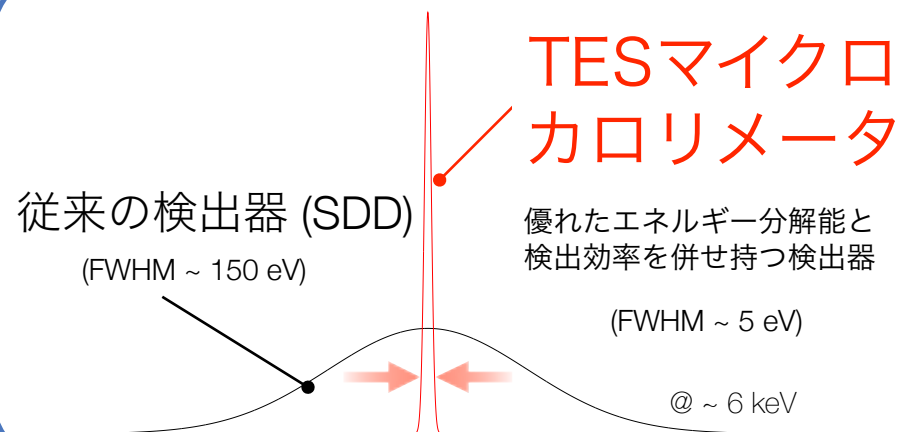
μCFの課題



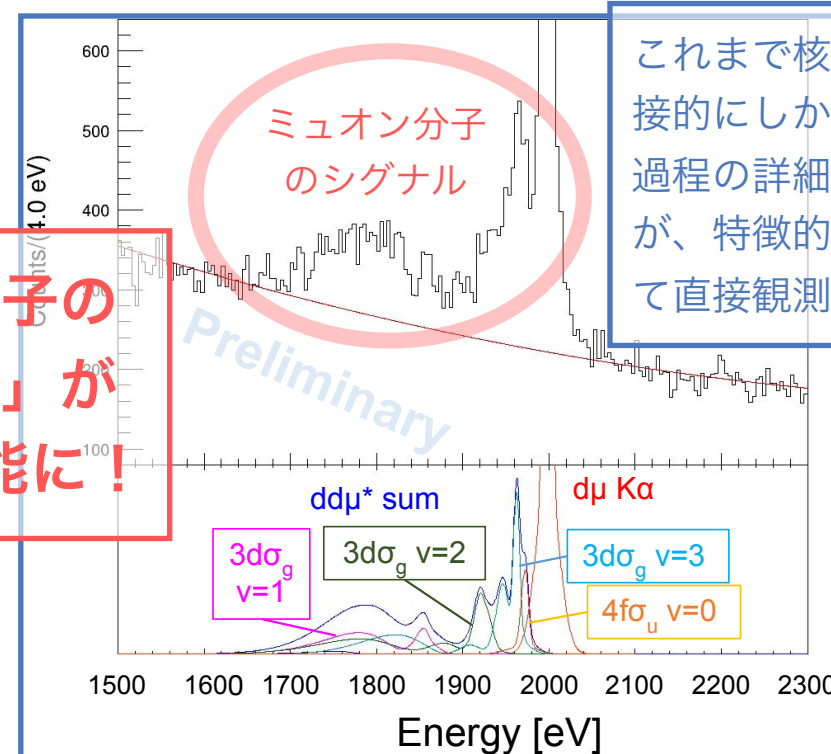
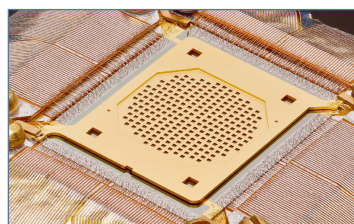
ブレークスルー

1. **共鳴ミュオン分子の重要な役割**を明らかにし新モデルを提案
Sci. Rep. 12, 6393 (2022)
2. サイクル数向上に寄与する **“Fast track”の発見**
Phys. Rev. A 111, 012811 (2025)
3. 共鳴状態からのX線を**世界で初めて直接観測**。これにより、これまで仮説にすぎなかった「分子内核融合」が実証され、μCF分子形成過程の**可視化と理解が飛躍的に進展**。

→ μCF研究は新たなフェーズへ



ミュオン分子の「量子状態」が直接観測可能に！



これまで核融合の副生成物から間接的にしか推測できなかったμCF過程の詳細な分子ダイナミクスが、特徴的なX線スペクトルとして直接観測できるようになった

PRL 127, 053001 (2021)
PRL 128, 112503 (2022)
PRL 130, 173001 (2023)

チャレンジ：μCFサイクル数の飛躍的向上の実証

- ✓ サイクル数向上実証に不可欠な**ブレークスルー実験技術**を確立
- ✓ **飛躍的向上の鍵**となる“Fast track”経路を発見
- ✓ 最新D-T標的実験で**サイクル数向上の兆し**（PRL 90, 043401）

統合的概念設計の早期実現に向け、横軸プロジェクトと連携し成果を積極的に活用：

- (a) 奥野PJの大強度ミュオン源・ミュオン生成技術の開発
- (b) 星PJの設計加速手法を概念・試作炉設計に活用
- (c) 木須PJの超電導技術の進展を位相空間制御の実証に応用

一点突破全面展開

前期 5 年：μCFサイクル数飛躍的向上の実証 と炉設計準備研究	後期 5 年：μCF炉実現に向けた 要素技術の統合実証	
第1ステップ（チャレンジ）： ・D-T混合標的の実現（高温・高密度） ・最先端の実験・理論融合でサイクル数向上の本質に迫る ・最適条件の探索からμCFでのbreakeven達成を目指す → 破壊的イノベーション	第2ステップ： ・サイクル数向上の実証でμCF炉の構想が可能に ・ミュオン位相空間制御によるビーム効率的輸送 ・炉設計と動作条件を炉工学的に検討	第3ステップ： ・左記の成果を統合 ・小型μCF炉実現に向けた学理基盤を整備

サイクル率向上

ミュオン位相空間工学

模擬実験・強磁場実験

標的システム・炉工学

要素設計→統合設計

高効率ミュオン生成

設計研究

社会での活用法開拓

調査→需要に基づく達成度評価

幅広い応用

プロトタイプ製作

プロトタイプ製作

プロトタイプへの製作調整

需要に合わせた設計

μCF炉実現
に向けた
要素技術統合

μCFの社会実装に向けて、加速器・ミュオン生成技術の開発は不可欠 → 横軸プロジェクトとの連携により、大強度ミュオン源・生成技術の成果を最大限に活かし、μCFの早期社会実装を目指す

②：ミュオン生成

7

 π

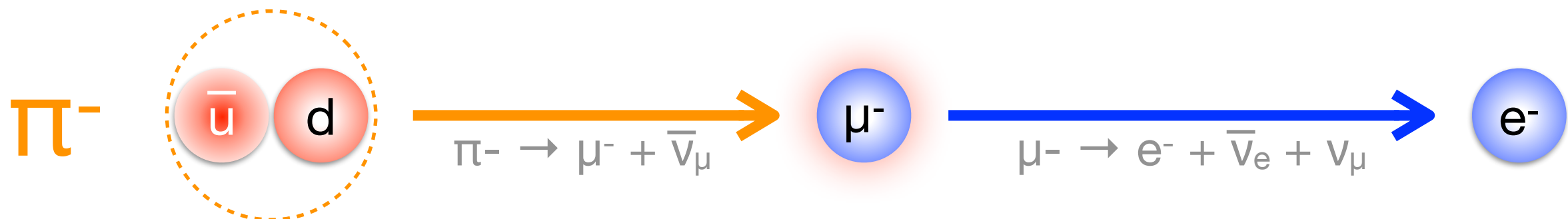
質量 = 140 MeV

 μ

質量 = 106 MeV

 e

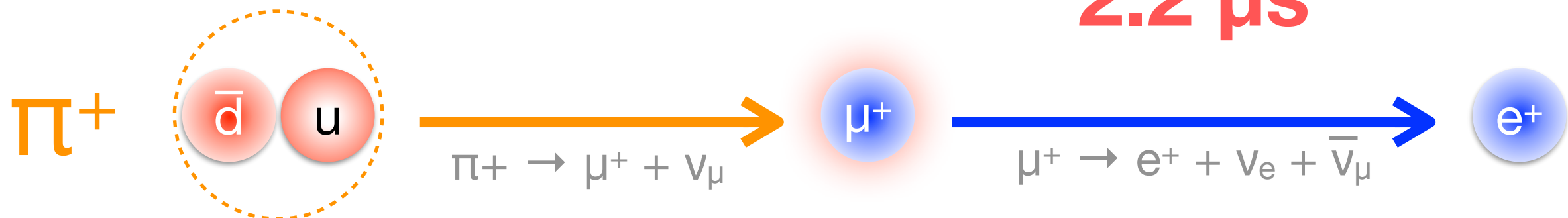
質量 = 0.5 MeV



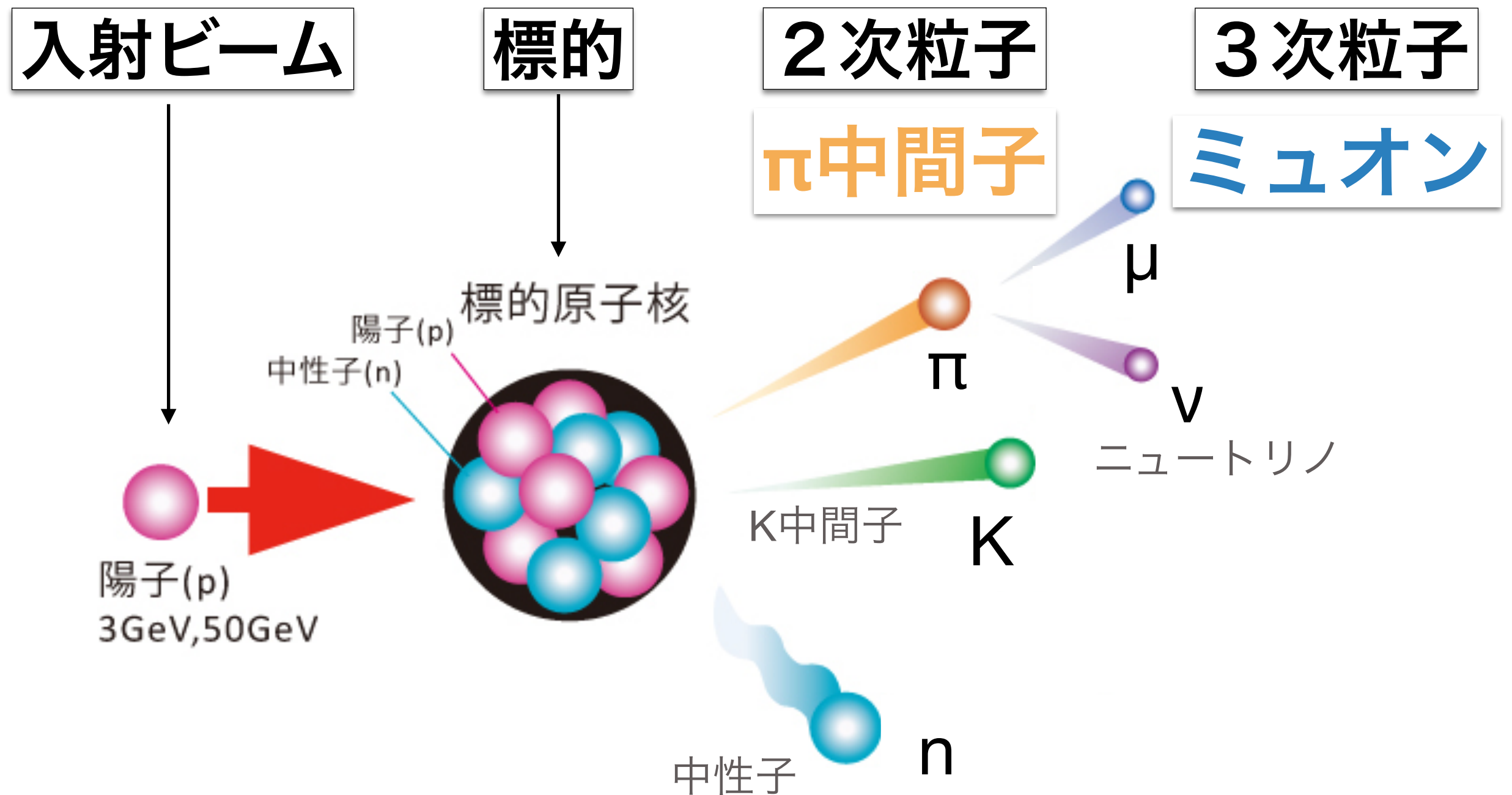
パイ中間子はすぐに
ミュオンに崩壊
(寿命 = 2.6×10^{-8} 秒)

ミュオンは比較的長生き
寿命はパイの100倍
(寿命 = 2.2×10^{-6} 秒)

$2.2 \mu s$

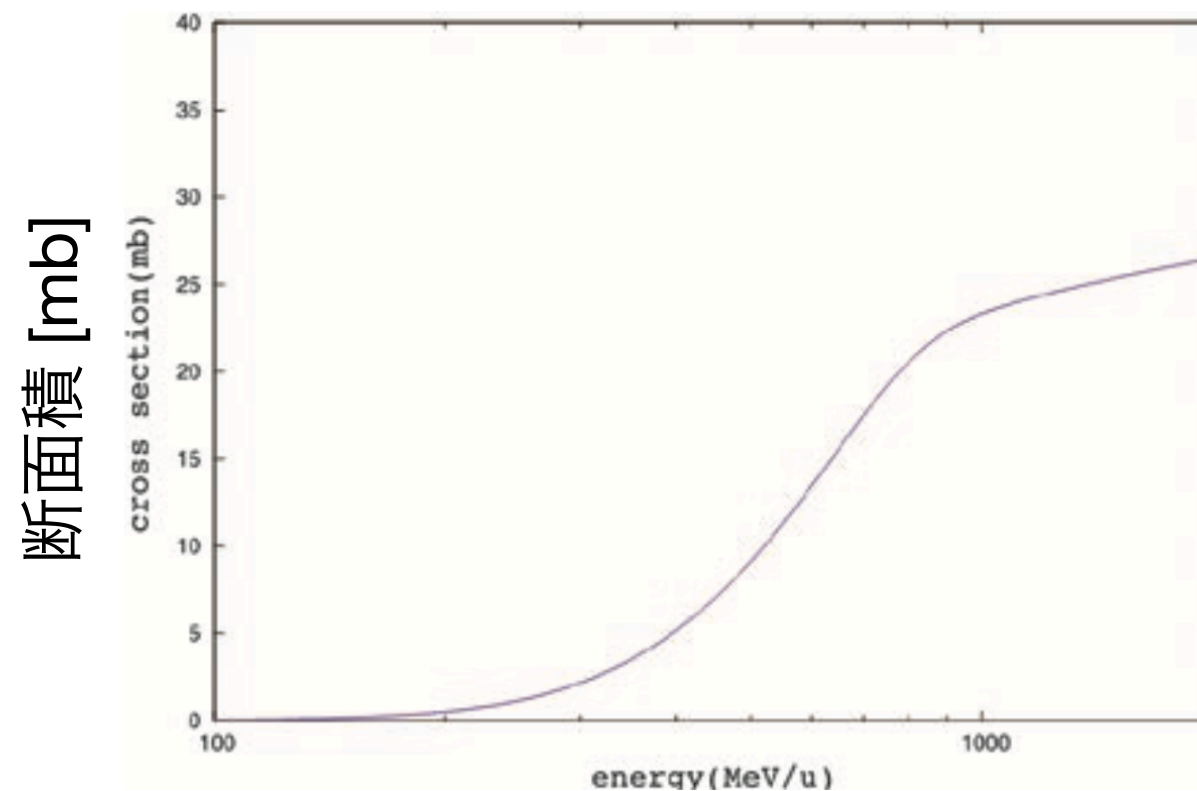


生成方法：3次粒子として作る⁸



生成断面積

陽子による全パイオン(π^+ , π^- , π^0)生成
断面積のエネルギー依存性



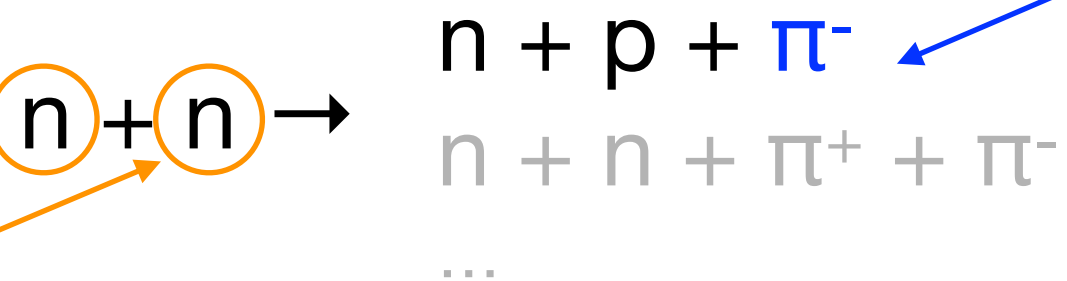
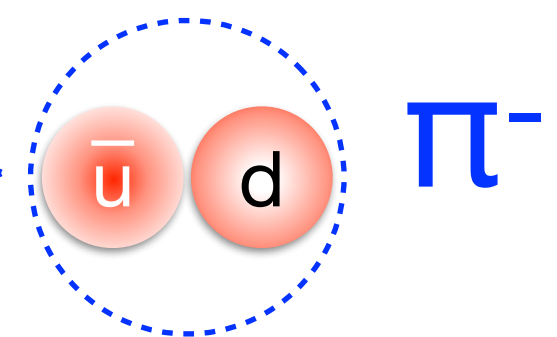
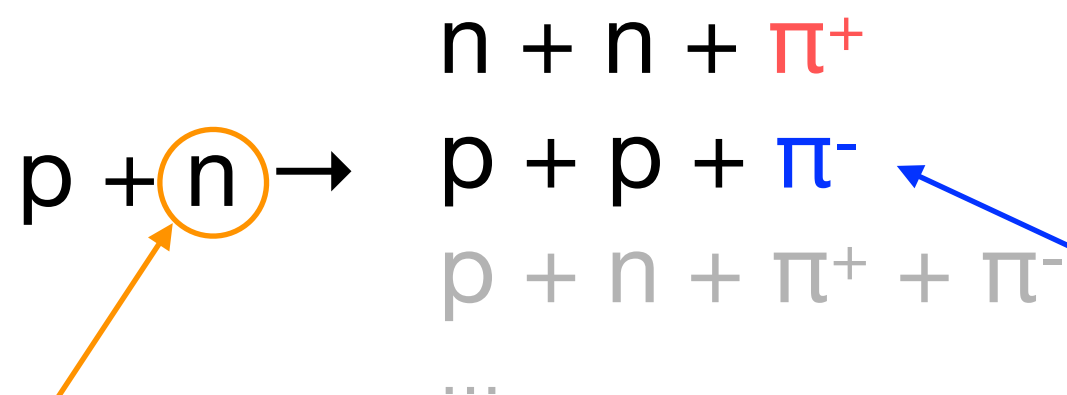
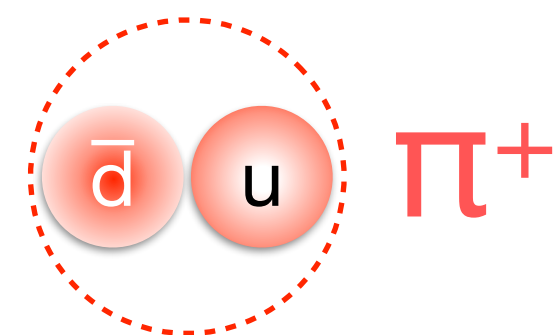
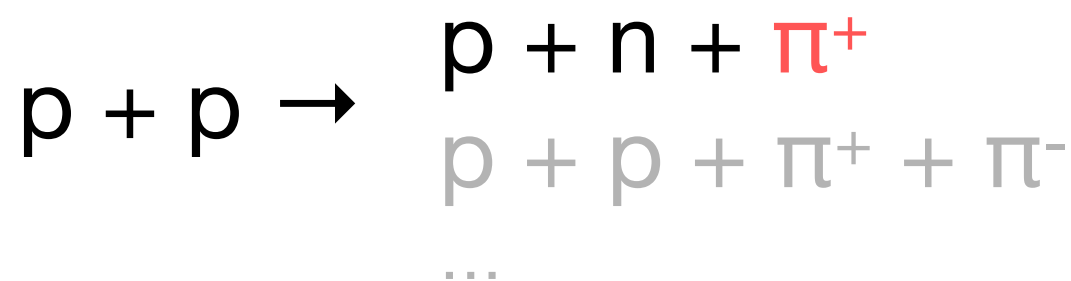
入射陽子エネルギー [MeV]

J. Plasma Fusion Res. Vol.99, No.7 (2023) 335-339
K. Niita et al., JAERI-Tech Report 99-065 (1999).

負電荷パイ中間子

ミュオン触媒核融合には**負電荷ミュオンが必要**

→ 効率よく負電荷パイ中間子を作りたい

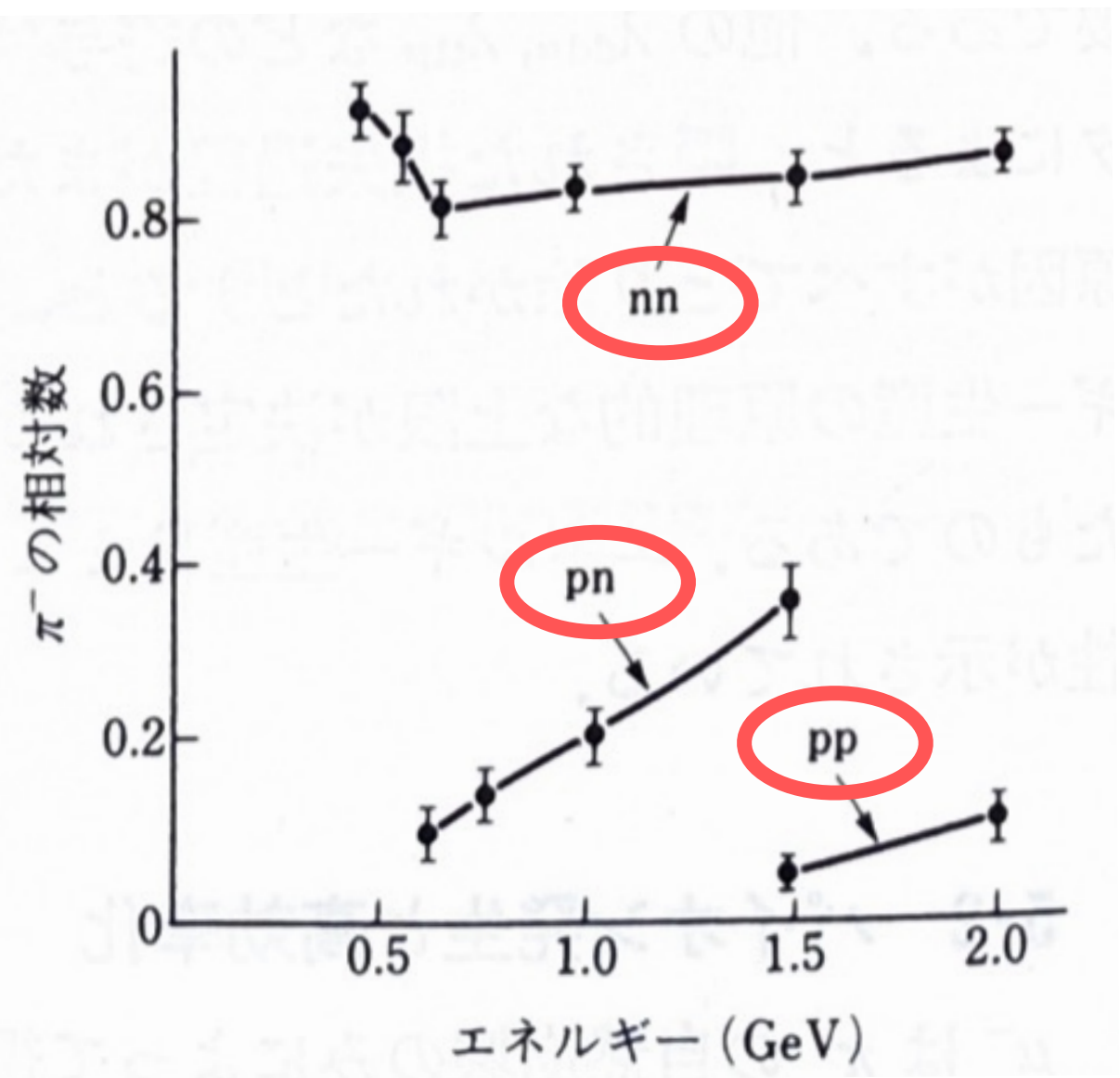
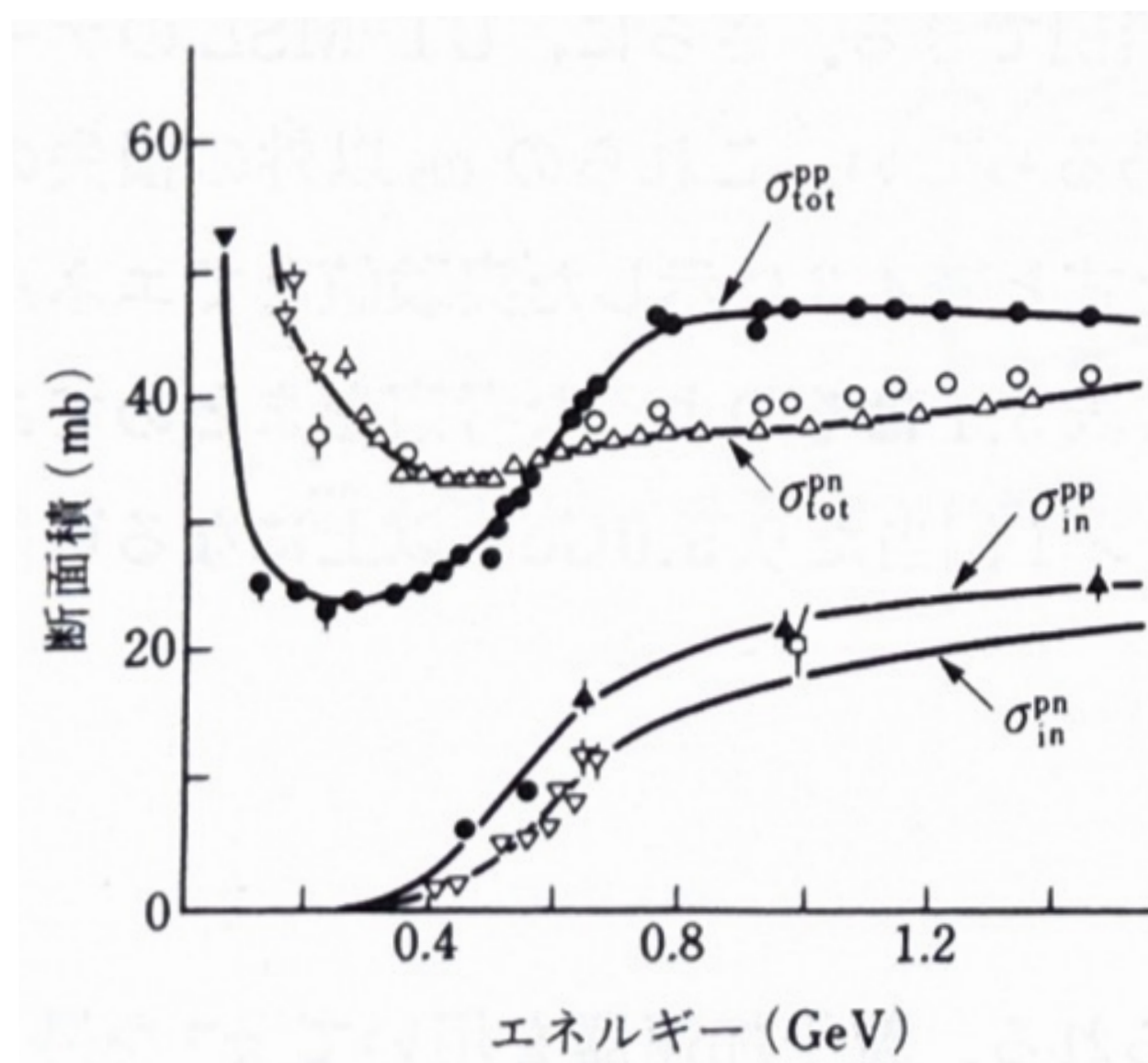


入射ビーム・標的原子核に、中性子を多く含んでいる方がよい

核子-核子系： π -発生量

核子-核子系における
反応断面積

π -発生量の
エネルギー依存性



重陽子ビームによる π -生成の優位性

陽子(p)、重陽子(d)、三重陽子(t) による非弾性衝突において
1 GeVの入射エネルギーで π -生成量を比較：

ターゲット	ビーム		
	p 陽子 ビーム	d 重陽子 ビーム	t
p	0	0.10	0.14
d	0.10	0.33	0.41
t	0.14	0.41	0.50

3倍
以上
→

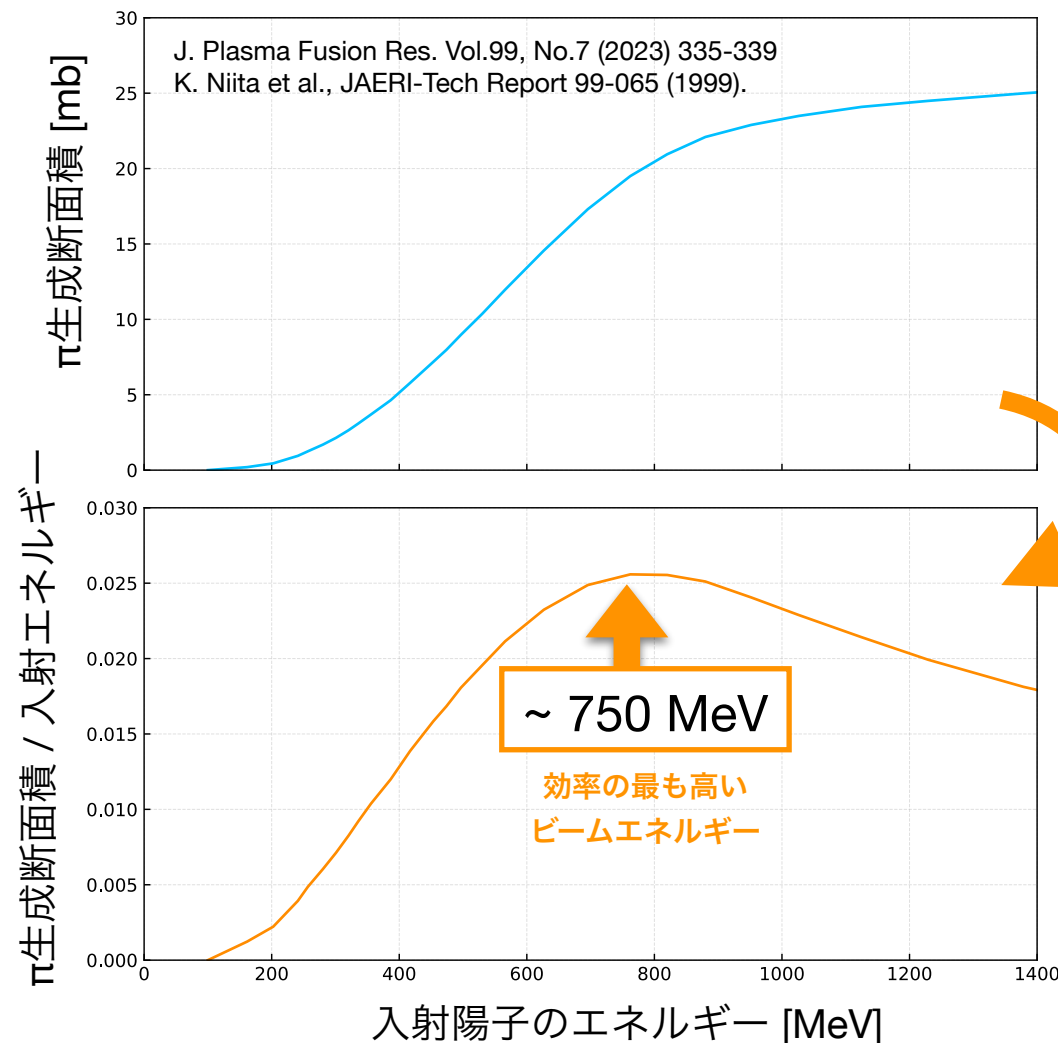
出典：物理学最前線19 p.119 (ミュオン触媒核融合 (永嶺))

μ CFには負ミュオン (μ^-) の高効率生成が必須

→ そのためのビームとして、**重陽子ビームが適している**

π 生成における最適ビームエネルギーの考察

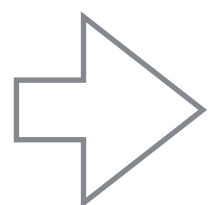
入射粒子が「陽子」の場合



π 生成断面積の
入射ビームエネルギー依存性

π 生成断面積を
入射ビームエネルギーで割った値：

→ 投入エネルギーあたりの π 生成効率



重水素ビームでも同様の検討が可能だがデータが無い

→ 最適エネルギーを決定には実測データが不可欠

③：加速器への要望

本ワークショップ「プロジェクト紹介」のページ引用

1A重陽子線形加速器の使い途

1 A重陽子線形加速器を軸とした加速器施設。核融合燃料、中性子照射試験（核融合炉材料およびブランケット）に留まらず、医療、医療用RI、材料試験、元素変換の実証と多彩な中性子利用に展開する事が可能

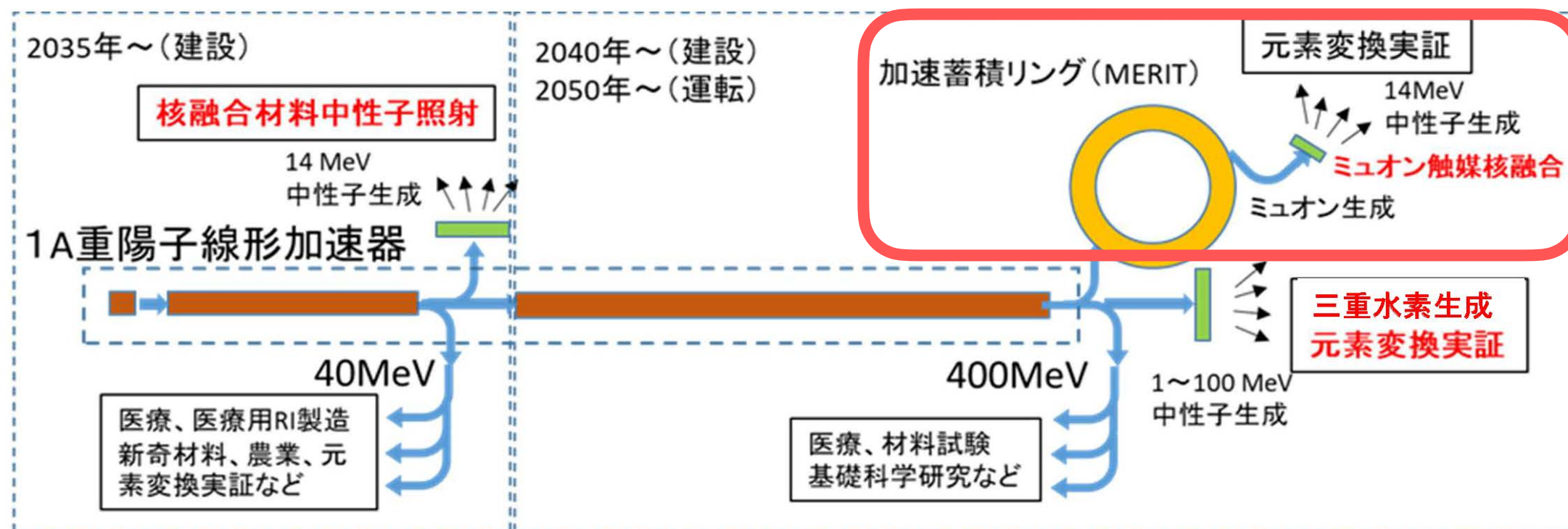
アウトカム：

IFMIFの10倍程度の中性子発生量→材料開発を一気に加速（破壊的イノベーション）

初期充填用核融合燃料を国産で生成

ミュオン触媒核融合の開発基盤提供

高レベル放射性廃棄物の処理（実証）



例えば、 μ CF 『30 MW』 出力の場合



入力 『10 MW』 重陽子ビーム → 1×10^{16} 個/s の負ミュオン生成

10 MW $\equiv 600 \text{ MeV/u} \times 8 \text{ mA} \rightarrow 1 \times 10^{16} \mu^- / \text{s}$ (捕獲効率50%を仮定)

[H. Okita, Y. Ishi and Y. Mori, Nucl. Inst. and Meth. A 982 (2020) 164565]

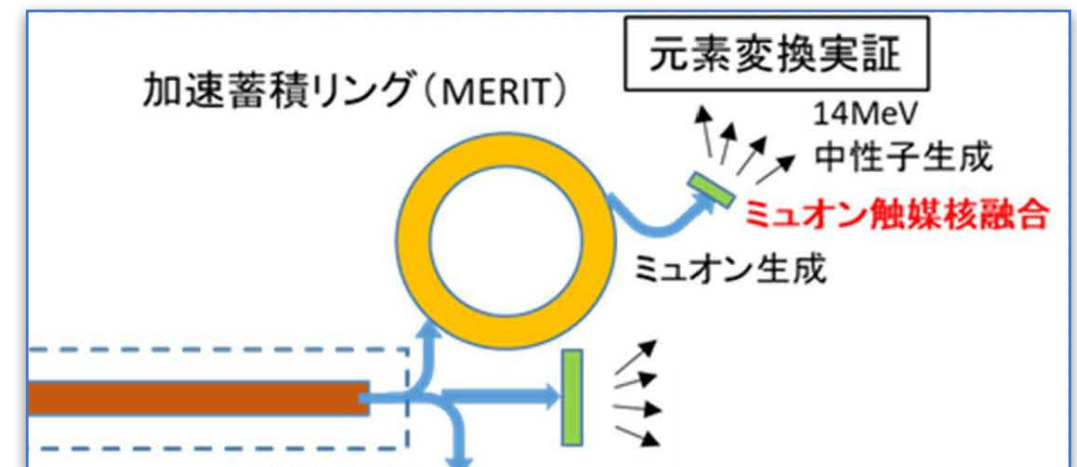
出力 『30 MW』 μ CFからの出力

サイクル数が1000 に達すると1ミュオンあたり17.6 GeVのエネルギー生成

30 MW $\equiv 10^{16} [\mu^-/\text{s}] \times 1.6 \cdot 10^{-19} [\text{A} \cdot \text{s}] \times 17.6 [\text{GeV}/\mu^-]$

電力網から重陽子ビームの電力への変換率を**約 30 %**と仮定すれば **「経済的 breakeven 達成」**

→ **10 MW (600 MeV/u, 8 mA)**
重陽子ビーム



④：まとめ

◎ μ CF研究は分子形成過程の可視化を通じ新たなフェーズへ

- ✓ ミュオン分子X線を世界で初めて直接観測 → μ CF過程の可視化と理解が飛躍的に進展
- ✓ “Fast track” 経路の発見やブレークスルー技術により → サイクル数向上の道が拓かれた

◎ μ CF実現には加速器・ミュオン生成技術が不可欠

→ 横軸PJと連携し、社会実装を加速する

- ✓ μ CFに必要な“負電荷”ミュオン生成には「重水素ビーム」が必須
- ✓ π 生成の最適エネルギー決定には実測データが不可欠
- ✓ 「 π 生成断面積／入射ビームエネルギー」(投入エネルギーあたりの π -生成効率)を指標に
(陽子ビームでは 750 MeV付近)

◎ μ CF炉実現に向けた加速器への要望

- ✓ ビーム種：重陽子 (ビームや標的に中性子が多いほど良い)
- ✓ ビームエネルギー：400 ~ 800 MeV/u (→最適値は要実測)
- ✓ ビーム強度：中性子利用の応用先により異なる
- ✓ [例] μ CF出力30 MWを目指すには→600 MeV/u・8 mA のdビーム (約10 MW入力) が必要