

# プロジェクトの概要説明

@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  
（ムーンショット目標10奥野プロジェクトキックオフ  
ワークショップ）

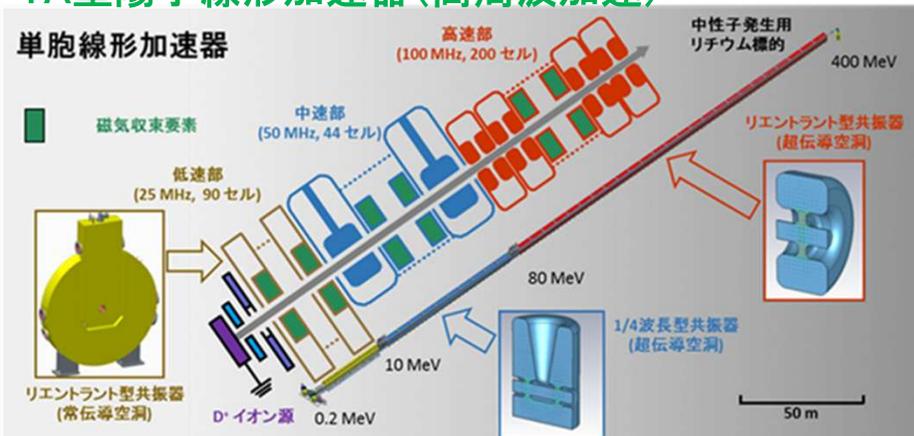
ムーンショット目標10奥野プロジェクト  
プロジェクトマネージャー  
理化学研究所 奥野広樹

# 核融合分野に貢献する加速器

貢献する加速器

期待される成果

## 1A重陽子線形加速器(高周波加速)



### 高速部 (400MeV, 1A, 重陽子)

中性子源

#### (A) 核融合”燃料”の安定した生成

高周波加速される高エネルギー重陽子のビーム強度を1A程度まで飛躍的に増強する技術の実装(高速中性子 $\rightarrow$ (n, xn)による増幅機能)

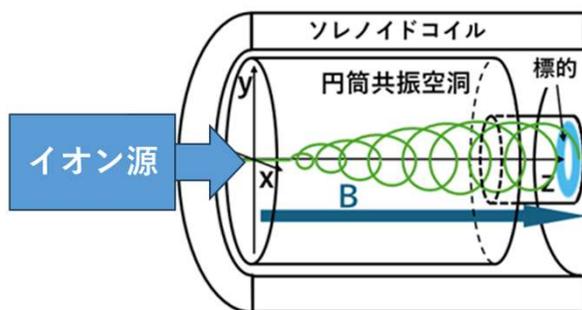
### 中速部(40MeV, 1A, 重陽子)

中性子源

#### (B) 炉内材料の”中性子耐性”の評価を加速

1A, 40MeVの重陽子ビームでIFMIF(国際核融合材料照射施設)の10倍の中性子束(量)で中性子耐性の評価を加速

## CARA(自動サイクロトロン共鳴加速器)



### 低速部(2MeV, 5A, 重陽子(負イオン))

高エネルギーNBI

#### (C) 商用炉・小型炉で必要とする超高温プラズマの維持と先進フュージョンシステム

- 重陽子ビームの高周波加速により商用炉用のプラズマ加熱装置の小型化
- CARA(自動サイクロトロン共鳴加速器)+FRCによる小型炉超高温プラズマの維持

ビーム駆動型小型フュージョンシステムの実現を目指す。

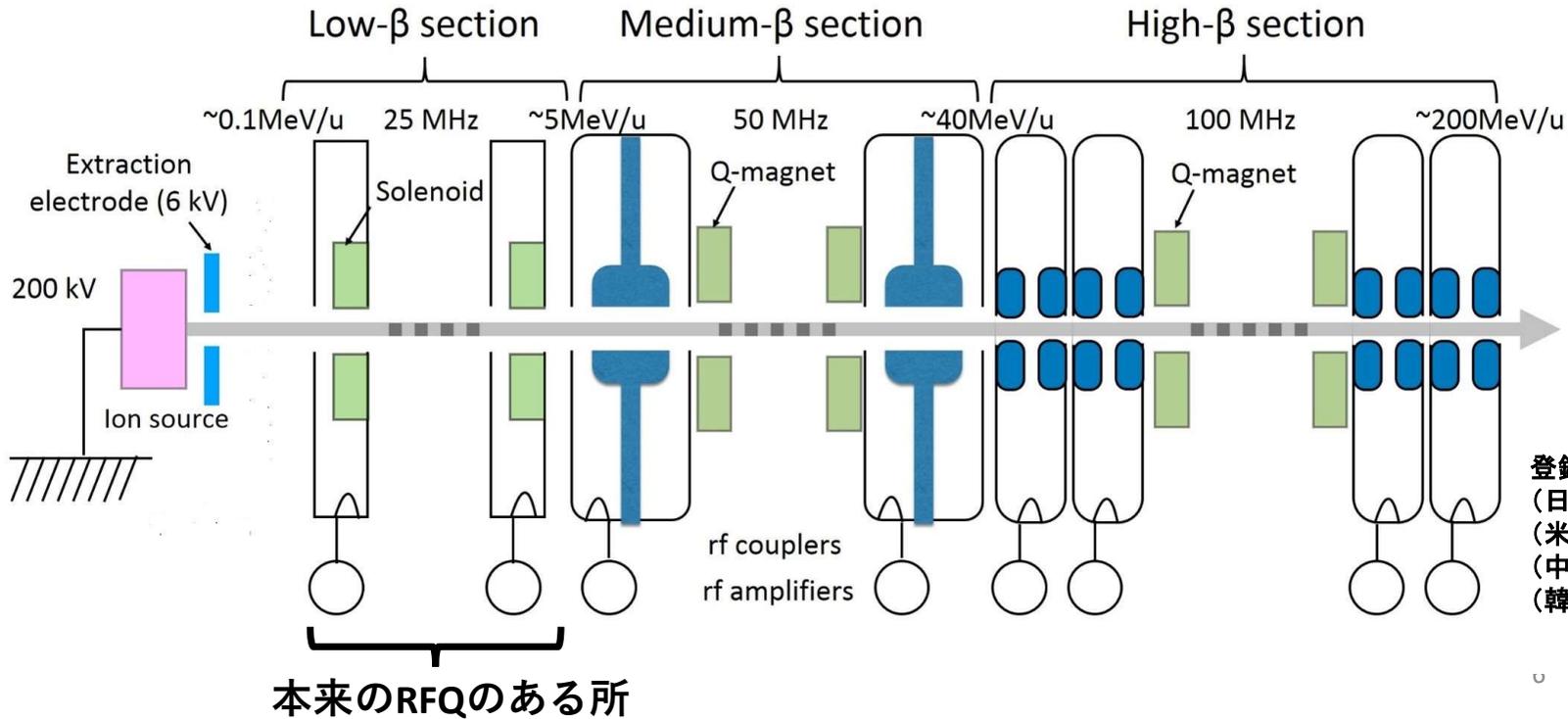
FRC (プラズマ反転配位) への入射

# 1A重陽子線形加速器

単胞空洞＋磁気収束要素：RFQ(高周波四重極加速器)を用いない加速システムを構築

## メリット

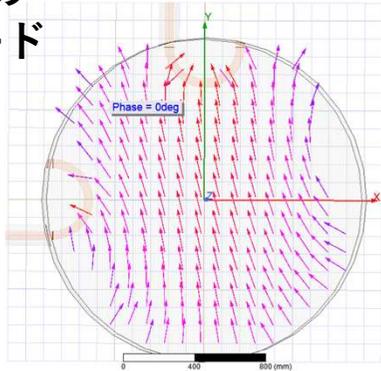
- 1: 放電のリスクの無い磁石集束素子を使用しているため、**大口徑ビーム**を受けることができる。
- 2: ビームサイズが大きいため電流密度が低く、**空間電荷力が緩和される**。
- 3: **各セルの電圧と位相を独立に選択**できるため、縦方向の空間電荷の影響を補正でき、RFQ入射部のような**DCビーム**に対して**効率的なバンチング機能**を実現できる



登録登録  
(日本特許番号7318935)  
(米国特許番号11432394)  
(中国特許番号111630940)  
(韓国特許番号102648177)

# CARA自動サイクロトロン共鳴加速器

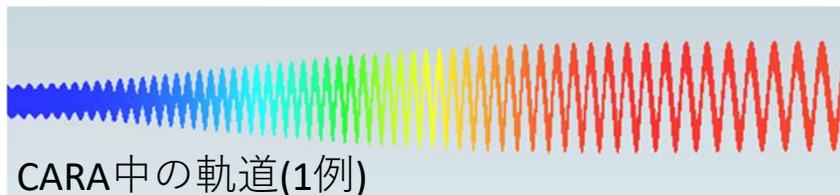
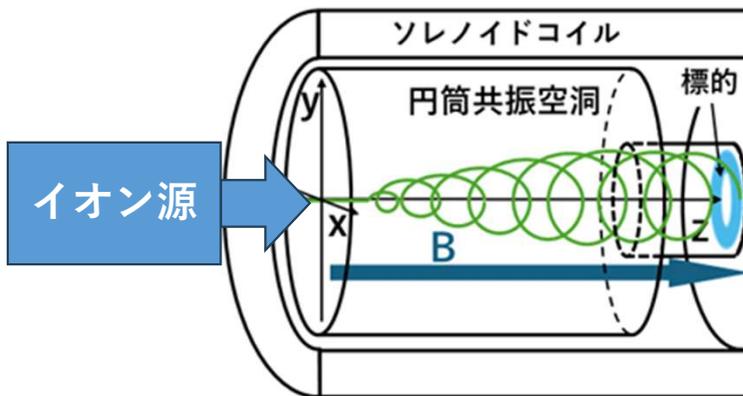
共振器内の  
TE111モード



サイクロトロン周波数

$$\omega = \frac{v}{\rho} = \frac{qB}{m}$$

サイクロトロン周波数=共振周波数  
→共鳴加速が実現する。

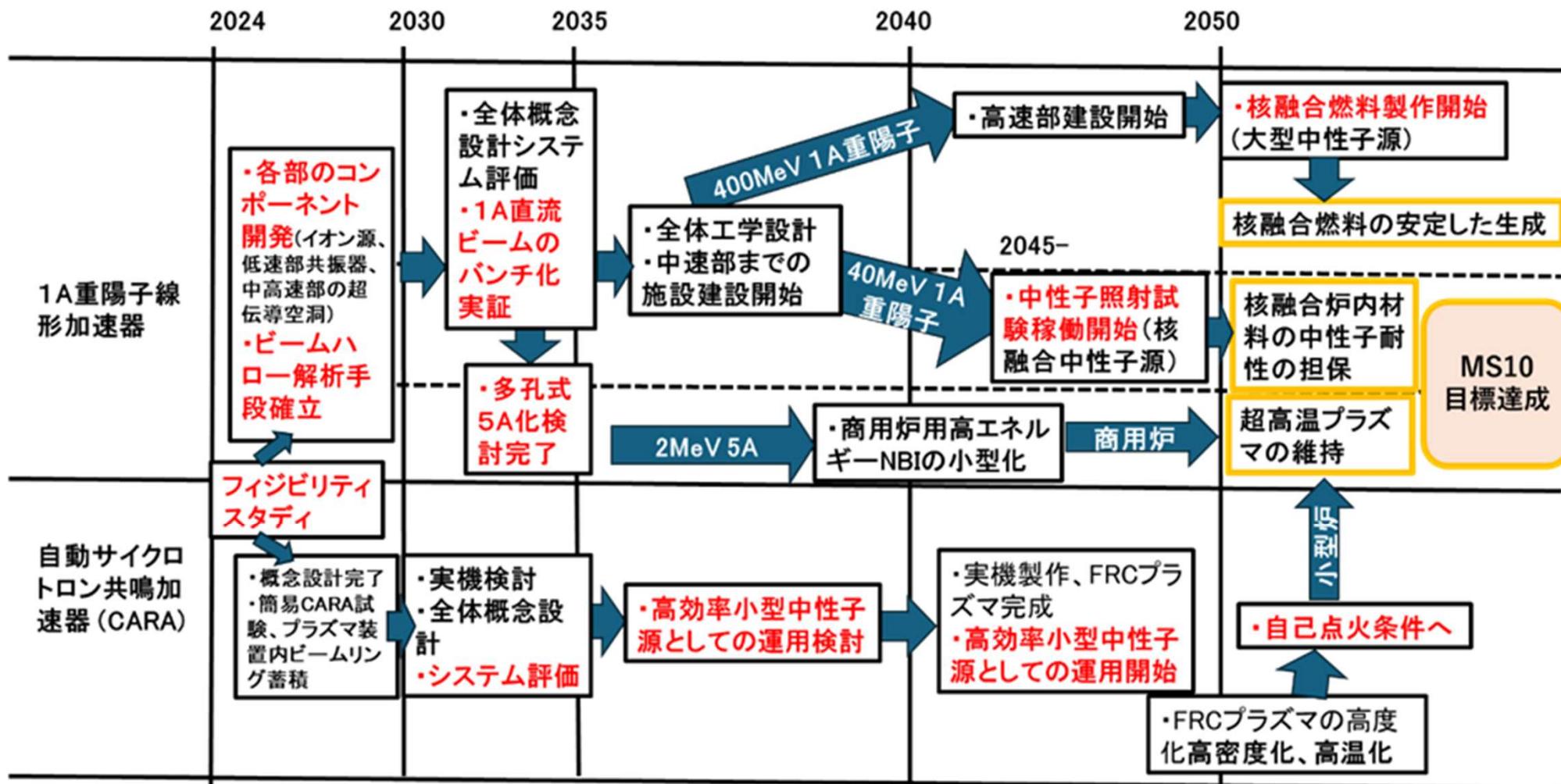


- 2000年代、Yale大のHirshfield等により提案された。その時の加速エネルギーは**1GeV**。
- 巨大かつ高磁場のソレノイドが必要なため、実現に至っていない。(電子では実証済み)
- 本プロジェクトでは、**最大1MeV程度(非相対論領域)**を目指す。

(特徴)

- 低エネルギー部の空間電荷の集中を緩和できる
- 直流ビームのまま加速できる (空間電荷力の緩和)
- ~~取り出しを前提としていない。(内部標的)~~
- 軌道形状がコンパクト。運動エネルギーの向きが円の接線方向。

# ロードマップ



# マイルストーン（1 A重陽子線形加速器）

年	マイルストーン
3	<b>フュージョンエネルギーにパラダイムシフトを起こす加速器の主要機器概念の成立性を技術的に検証。</b> 1：(イオン源)イオン源からビームを取り出す。 2：(低速部共振器)極薄形状共振器の成立性を実証。 3：(中高速部共振器)ハイパワー大口径超伝導共振器の成立性を実証。
5	<b>フュージョンエネルギーにパラダイムシフトを起こす加速器の挑戦的要素技術の確立。</b> 1：(イオン源)イオン源から1 A直流を加速器のアクセプタンス内に取り出す。 2：(低速部共振器)共振器のハイパワー励振を実現。 3：(中高速部共振器)カップラーのハイパワー耐性を実現。 4：(中高速部共振器)大口径高速部共振器の性能評価。
10	<b>フュージョンエネルギーにパラダイムシフトを起こす加速器の実現のために、多面的システム評価を行い、加速器の全体設計を完了させる。</b> 1：加速システムの多面的評価の完了。 2：1 Aビームのバンチングを実証。

**10年目にバトンを渡す。**

**バトンの内容（イオン源、ビーム制御技術、低速部共振器バンチングに必要な数、中高速部の1 MWキャビティ 1set）**

# マイルストーン (CARA)

年	マイルストーン
3	ビーム駆動核融合システムに破壊的イノベーションをもたらす、コンパクトで高効率な加速器の概念設計と、核融合システム全体の概念設計を完成。
5	革新的なイオン加速器であるCARAの動作可能性を実験的に確立する。
10	先進ビーム駆動核融合システムの基本設計の確立。

抽象的

# プロジェクト強化のためのFS

## 1 A重陽子線形加速器

### ビームパワーを制限するもの

- 核融合分野からの要望（本ワークショップ）
- FS1-1(加速器パラメータの最適化)

標的の除熱能力 (400 MW)

中性子コスト、トリチウムコスト

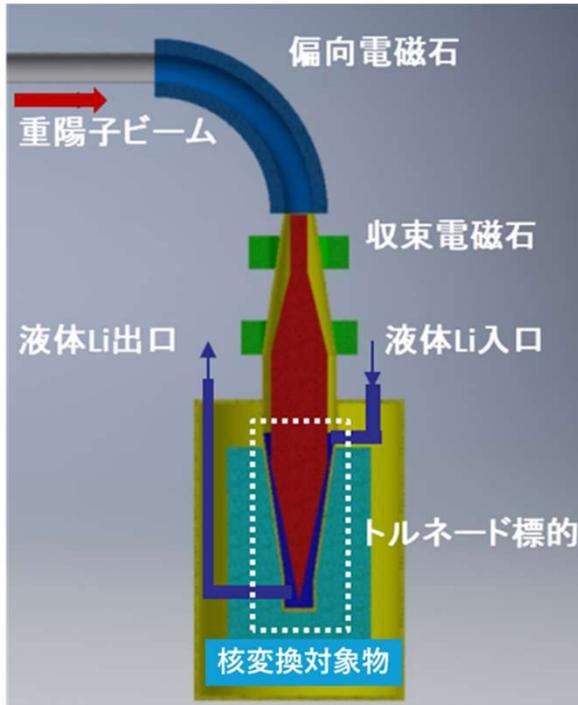
(物理的なコスト、建設コスト、運転コスト)

- FS1-2 (1 A線形加速器) ビームシミュレーション

機器破損(制御不能なビームロス (ビームハロー)  $< 1\text{W/m}$ )

通常のPIC( $10^8$ 分の1の粒子の制御)、シュレディンガーアプローチ、アナログシミュレーター(Spod 広岡本氏)の可能性

# トルネード標的



TOTOのトルネード洗浄



ビーム照射による発生熱は、液体リチウムの流れにより効率的に除去する。

液体リチウムを使う利点: 真空中での蒸気圧が低い。上流の加速器機器の真空とビーム窓を介さず接続することが出来る事である

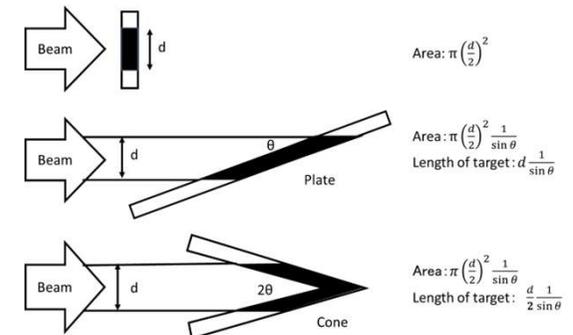
最も避けなければならない事: 標的である液体リチウムの沸騰 (技術課題)

→トルネード標的を採用

”トルネード標的”は、円錐形の内壁に沿って液体リチウムが旋回する様に流し、その部分にビームを照射し標的とするものである。液体リチウムの遠心力により圧があがり、

## トルネード標的のメリット

1: コンパクトネスを保ったまま、照射面積を広げて単位面積当たりの入熱を減らし、局所的な温度上昇を抑える事が出来る。



2: 液体リチウムが円軌道を描くことによる遠心力を用いて液体リチウムの圧力を増やし、実効的に沸点を上昇させ液体リチウムの突沸を防ぐ。

標的のすぐそばに核変換対象物を容易に置くことが可能。

→ **効率的な核変換**

# プロジェクト強化のためのFS CARAの使い道(FS1-3)

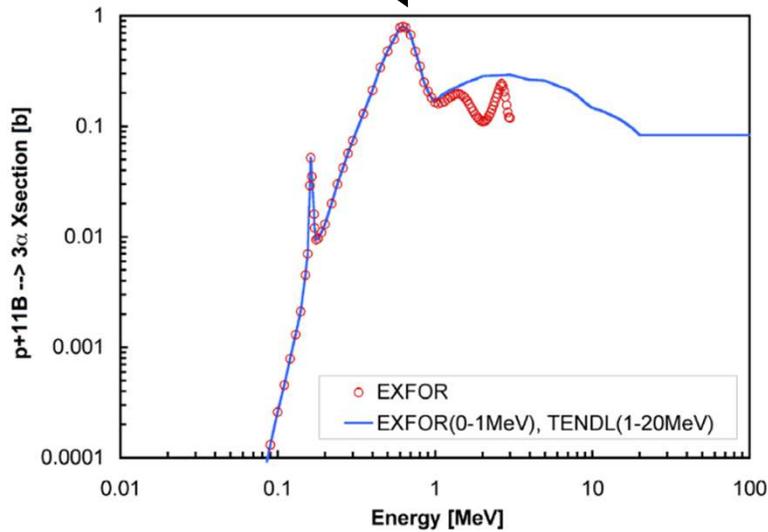
- **ビームのプラズマ(標的)への入射**
  - 入射方法
  - 入射されたとして、**その発電量は？**
- **その他の使い道を探る**
  - ガス標的に入射した時の使い道 (DT中性子の発生)
  - **ビームの取り出し方法を確立→幅広い応用**

# CARA (カップリング)

FRC(磁場反転配位)プラズマへの高速(約1MeV/u) ボロンイオンを入射

陽子 +  $^{11}\text{B} \rightarrow 3\ ^4\text{He}$ の断面積

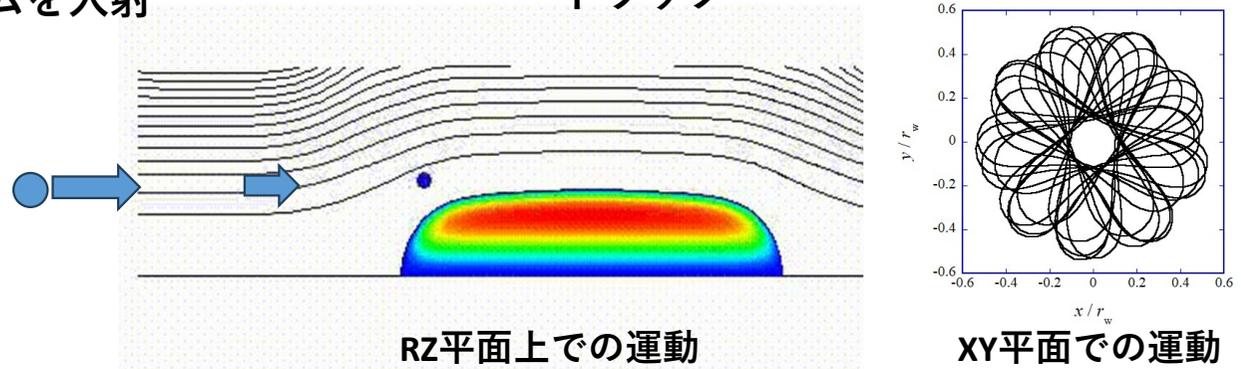
600keV 1Bahn



[<https://arxiv.org/abs/1802.09482v2>]

荷電変換が必要

CARAからの  
ビームを入射 → (減速) → FRC内に  
トラップ



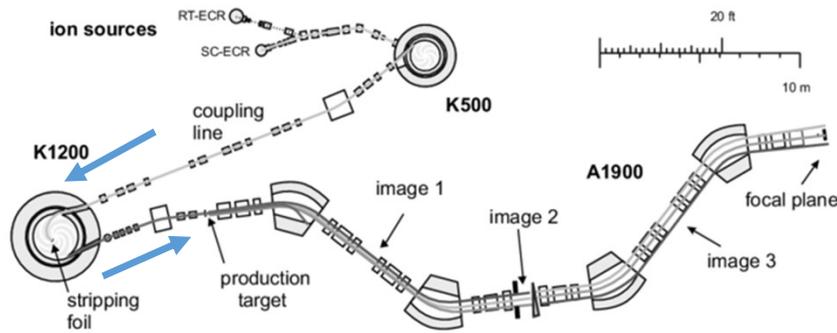
CARAとFRCプラズマ装置を接続したビームシミュレーションを開発中

$\text{H}^{2+}$ (1MeV/u)も検討可能

# サイクロトロンへの荷電変換入射の例 MSU

MSU coupled Cyclotron project

サイクロトロン1



サイクロトロン2

- FRCの場合は、 $B^{4+}$ をプラズマ中で $B^{5+}$ にして入射（これは、エネルギー的に損?）
- $H^{2+}$ を入射して、プラズマ中で $H^{+}$ にする。  
**プラズマへの入射は、中性粒子入射だけではない。**

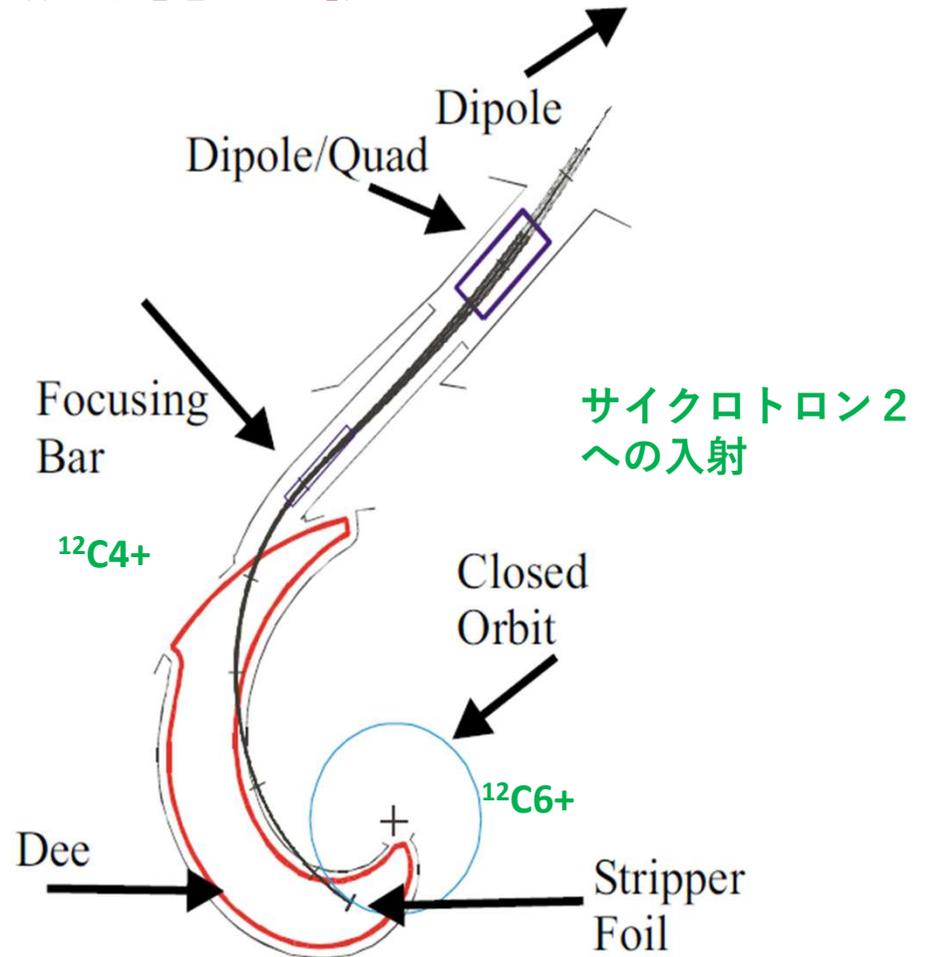
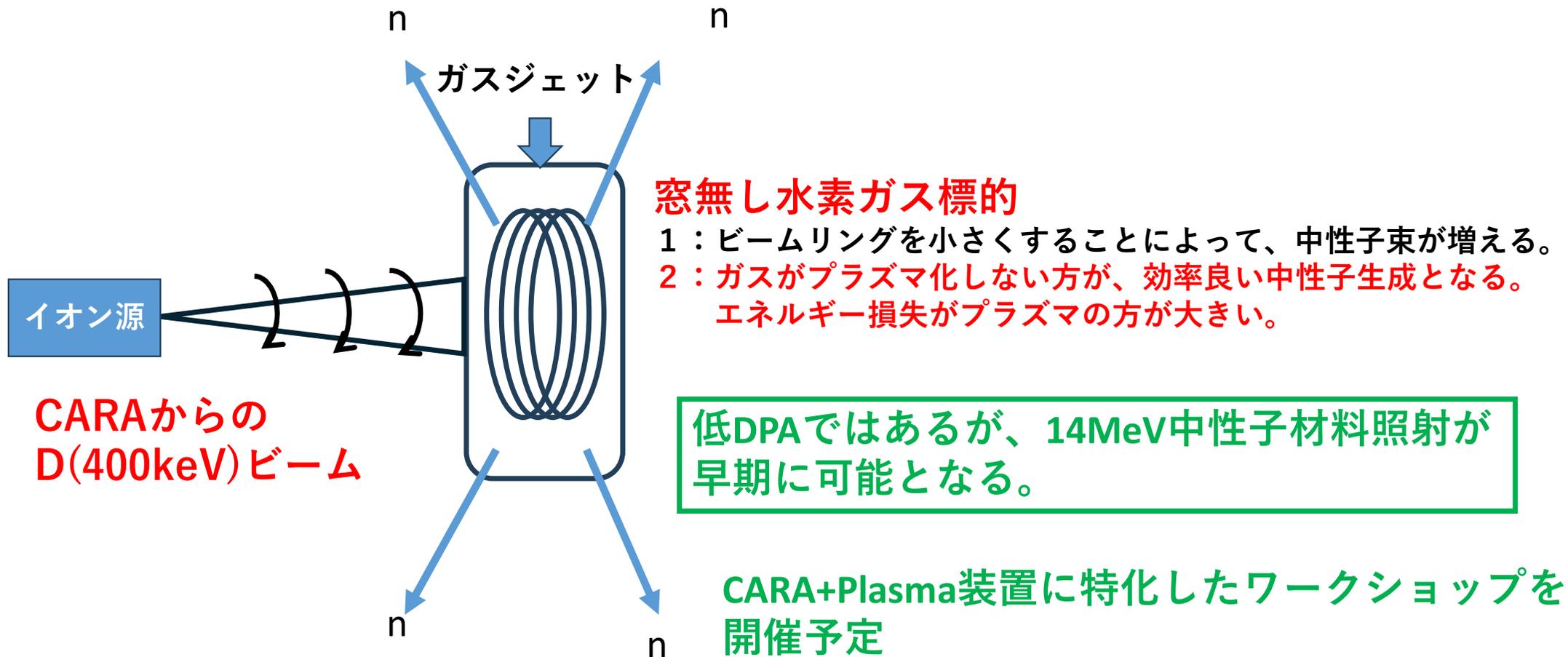


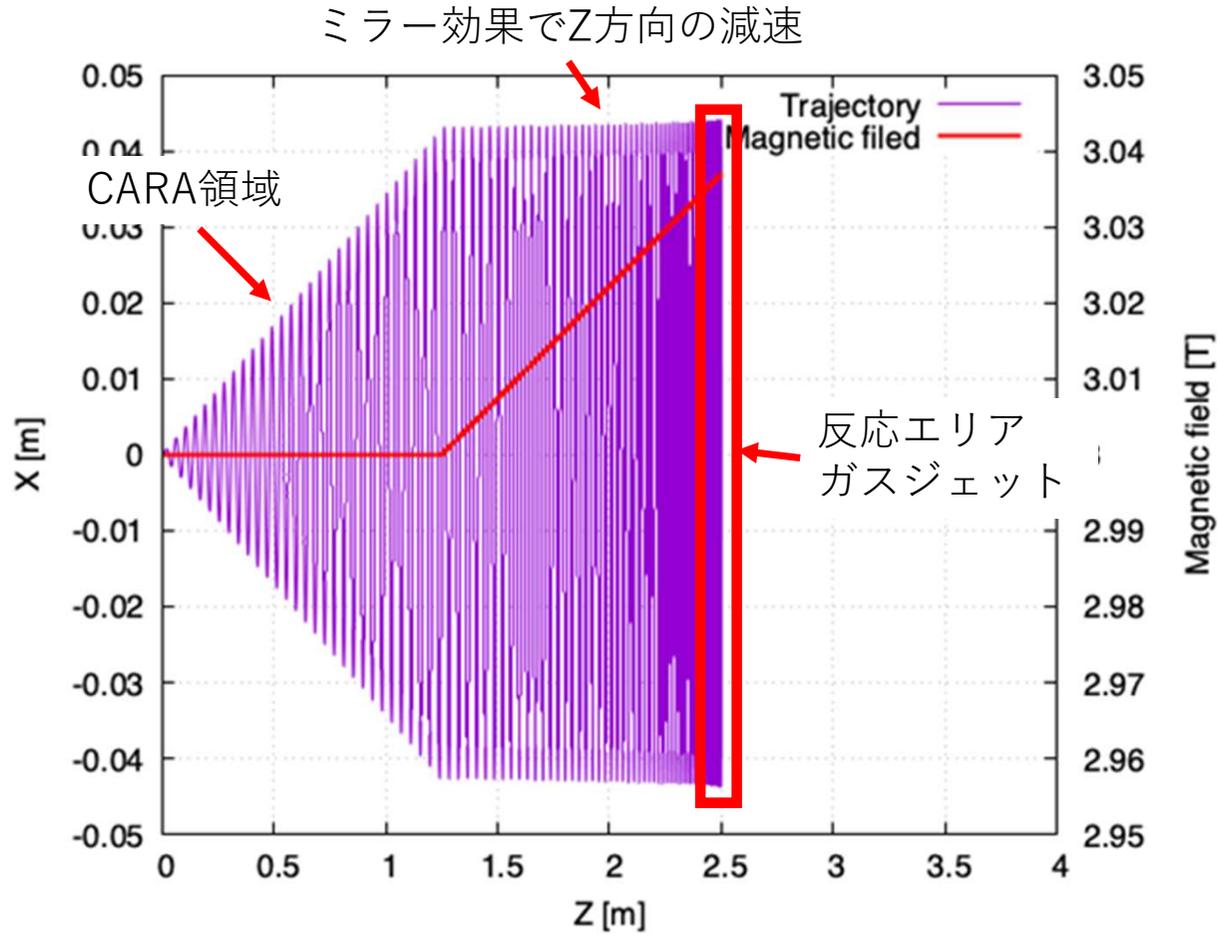
Figure 5: Injection channel path. A dipole is situated just outside the top of the figure. The thick red line indicates the dee profile

# CARAの用途（一例）

## DT反応による14MeV中性子源

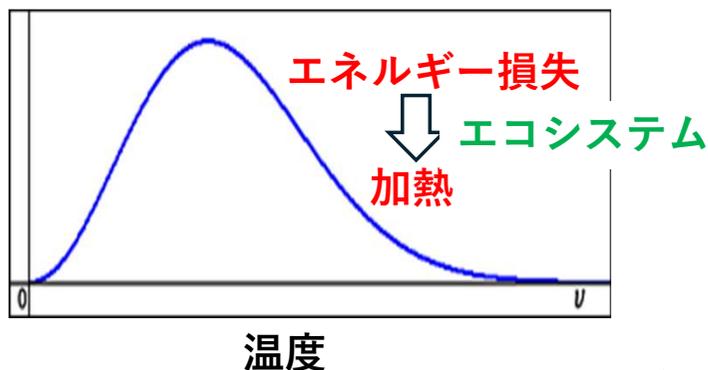


# ガスジェットの場合の軌道

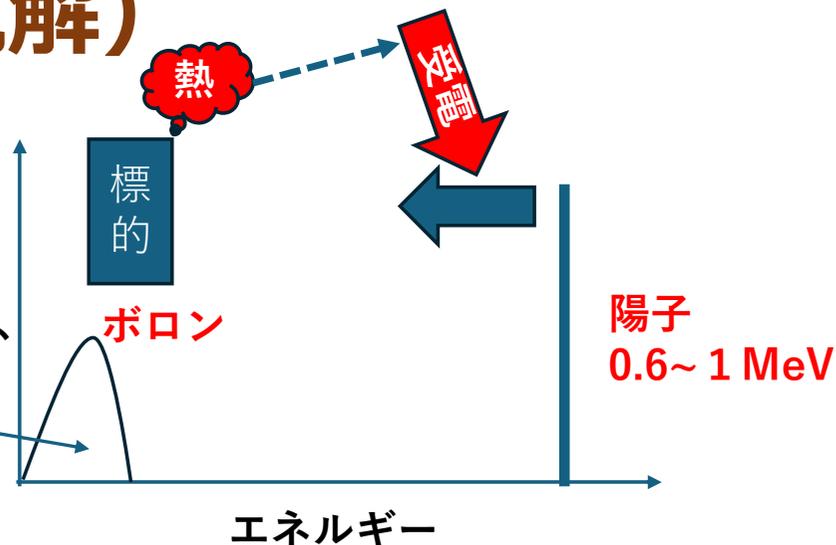


# ビーム駆動型フュージョンシステムの考え方 (個人的見解)

熱プラズマ  
 プラズマ内の粒子  
 同士で核融合反応  
 が起きている



ここの高温化は  
 反応率の向上は、  
 期待できない



反応率： $\left(1 - \frac{1}{e^{\sigma t}}\right)$

$\sigma$  核融合反応断面積  
 $t$  標的の厚み~飛程

陽子が1個入った時に1回の核融合反応が起きる→ $\sigma t$ が3程度になる事が必要 (95%)

中性ガスを標的に当てた時の反応率0.0001程度(DT反応)

プラズマ内で $t$ は伸びるか？プラズマ内でのエネルギーロスを減るのか？(期待)

(cf. 中性子は電磁相互作用がないので $\sigma t$ を大きく1を超えられる)

# プラズマ中でのエネルギーロスは大きい

(1)

物性論研究 1956年1956巻94号p1-23

種々の媒体中における高速荷電粒子のエネルギー損失

基礎物理学研究所 早川幸男  
大阪市大理工学部 北尾一夫

(1956年2月8日受理)

$T$ は絶対温度、 $k$ は Boltzmann 常数である。荷電粒子の通路を軸とする、 $\lambda_0$  程度の半径  $r$  の円筒を考え、この円筒内では直接衝突により、外ではプラズマ振動の励起によりエネルギーを失うと考える。全エネルギー損失の式には  $r$  が含まれないから  $r$  を正確にとる必要はない。この円筒外の領域によるエネルギー損失は、 $\epsilon_\omega$  として(60)を用いて §2 におけると同様の計算をすれば **プラズマ振動の励起によるエネルギーロス(大)**

$$-\left. \frac{dE}{dz_0} \right|_r = \frac{2\pi Z_1^2 e^4}{mc^2 \beta^2} N_0 \alpha \left[ \ln \frac{4c^2 \beta^2}{\gamma^2 |1 - \beta^2 \epsilon_{\omega p}| \omega_p^2 r^2} - \beta^2 \epsilon_{1, \omega p} \right] \quad (64)$$

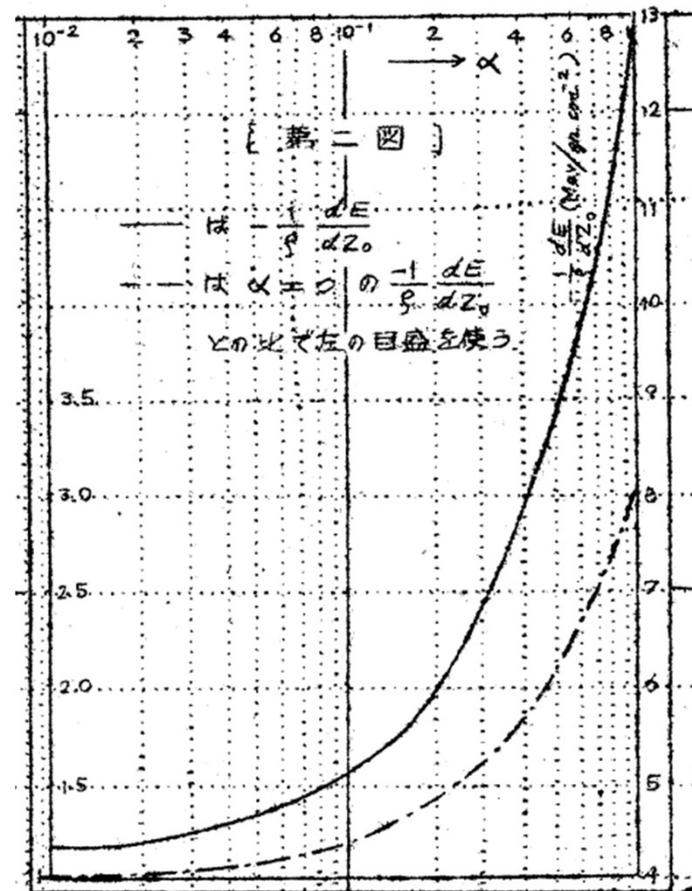
円筒内でのエネルギー損失は、§2 で述べたように二体衝突の問題で、Born 近似を用いて計算する。この場合衝突径数の上、下限として夫々  $r$  ( $\sim \lambda_0$ ) 及び電子の Compton 波長をとると (附録 IV) **自由電子との直接衝突(小)**

$$-\left. \frac{dE}{dz_0} \right|_r = \frac{2\pi Z_1^2 e^4}{mc^2 \beta^2} N_0 \alpha \ln \frac{m^2 c^2 \beta^2 r^2}{(1 - \beta^2) \hbar^2} \quad (65)$$

電離度=0

電離度=1

エネルギー損失

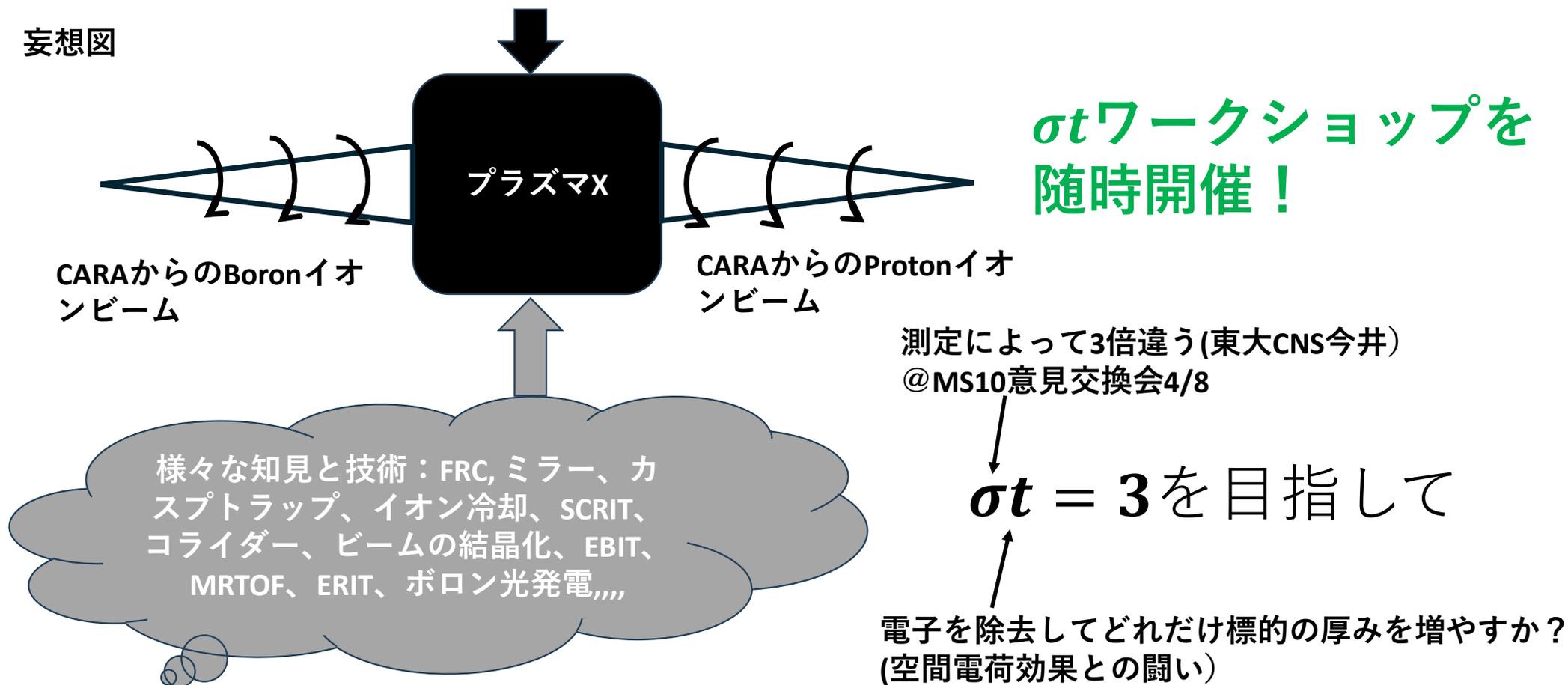


結論：電子は邪魔

# 先進フュージョンシステムの絵がまだ描けない

中和器（必要最低限の電子）      マイルストーンが書けない→CARAの危機

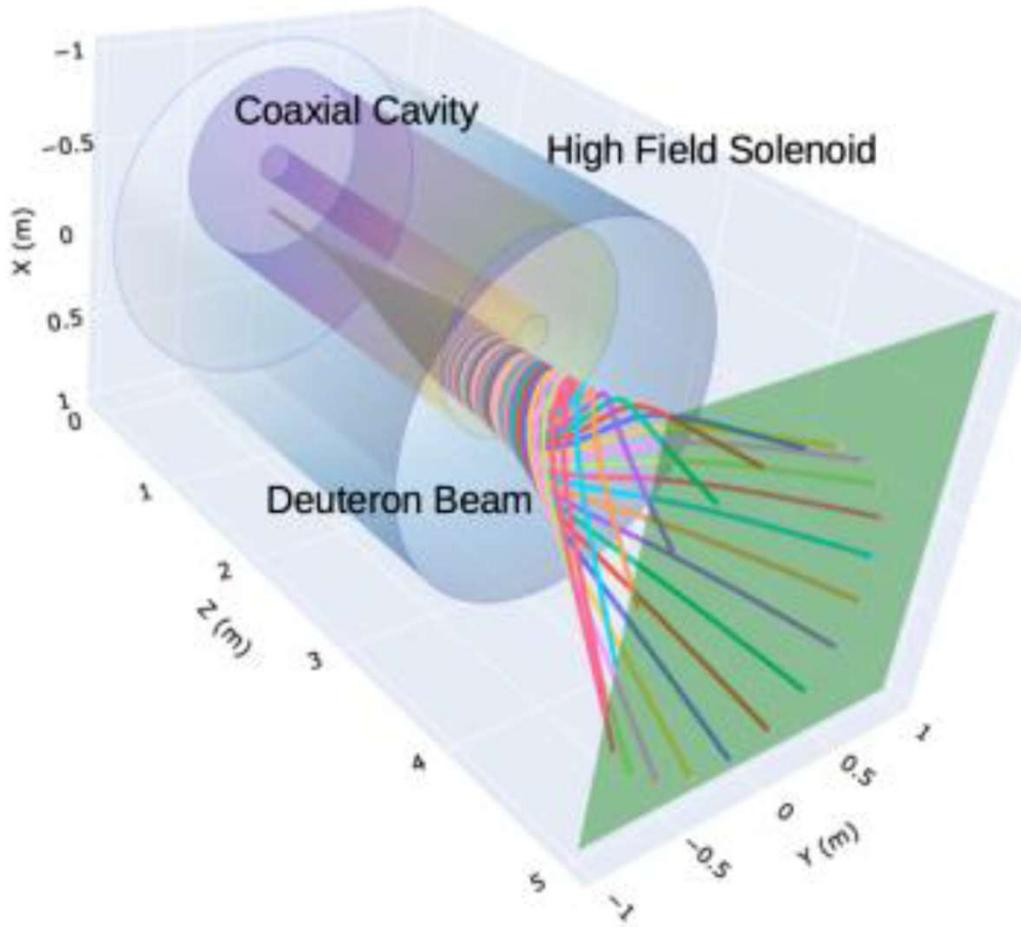
妄想図



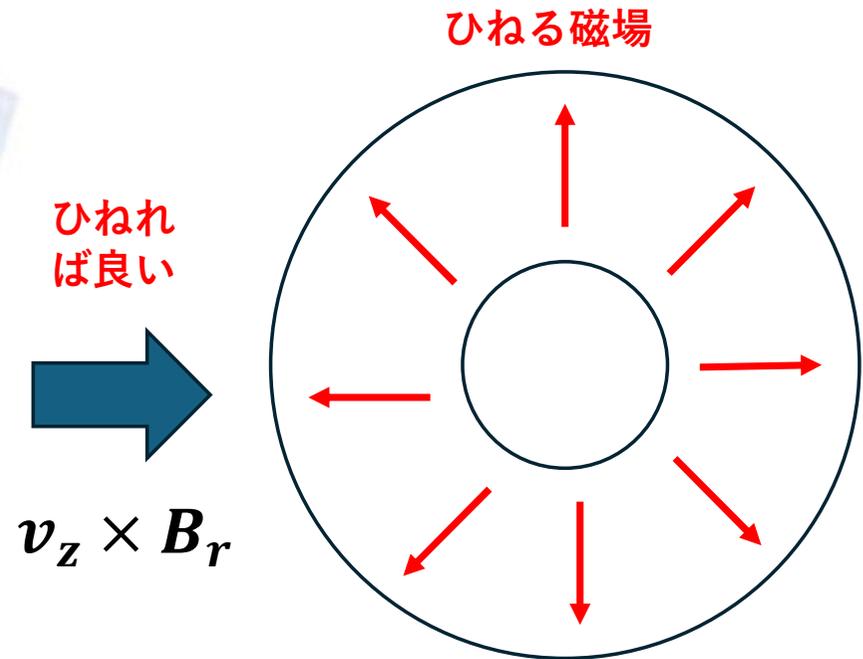
# CARAのビーム取り出し方法

D, 40MeVまで加速可能  
Omega-P+BNLのグループの設計

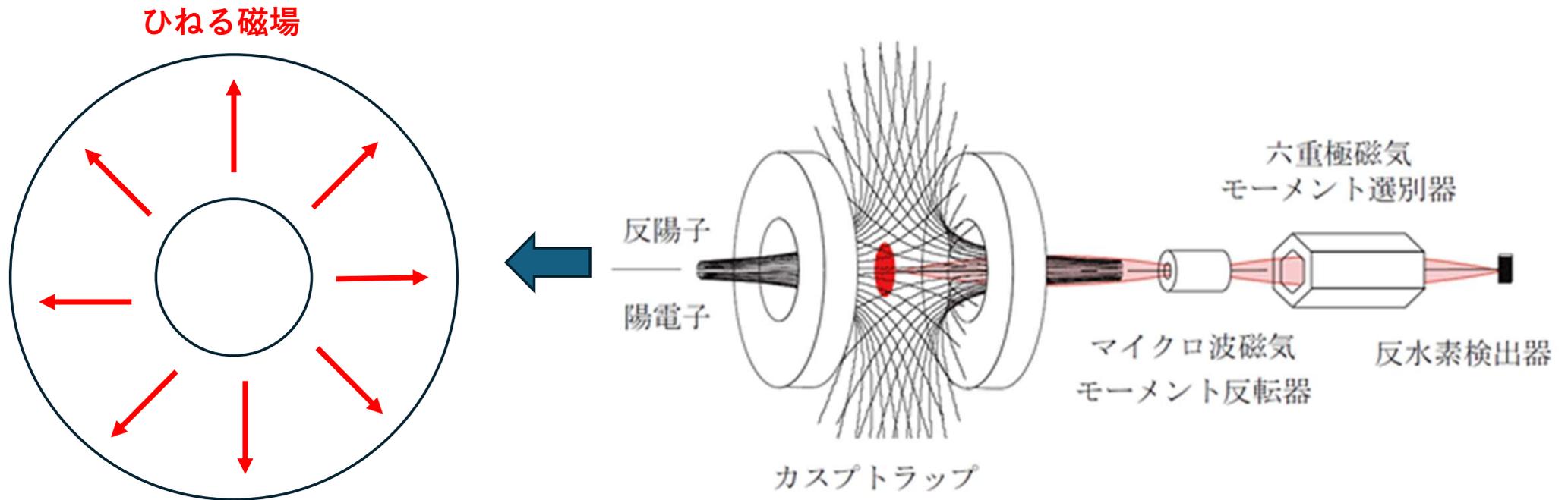
dCARA後のビームの散逸 (低dpa)



- この散逸を何とかしたい (集束した状態状態で取り出したい。)
- 回転方向のイオンの速度をソレノイド軸方向の直線方向に変換するには、以下の様な磁場があればよい。



# ひねる磁場→カスプ磁場

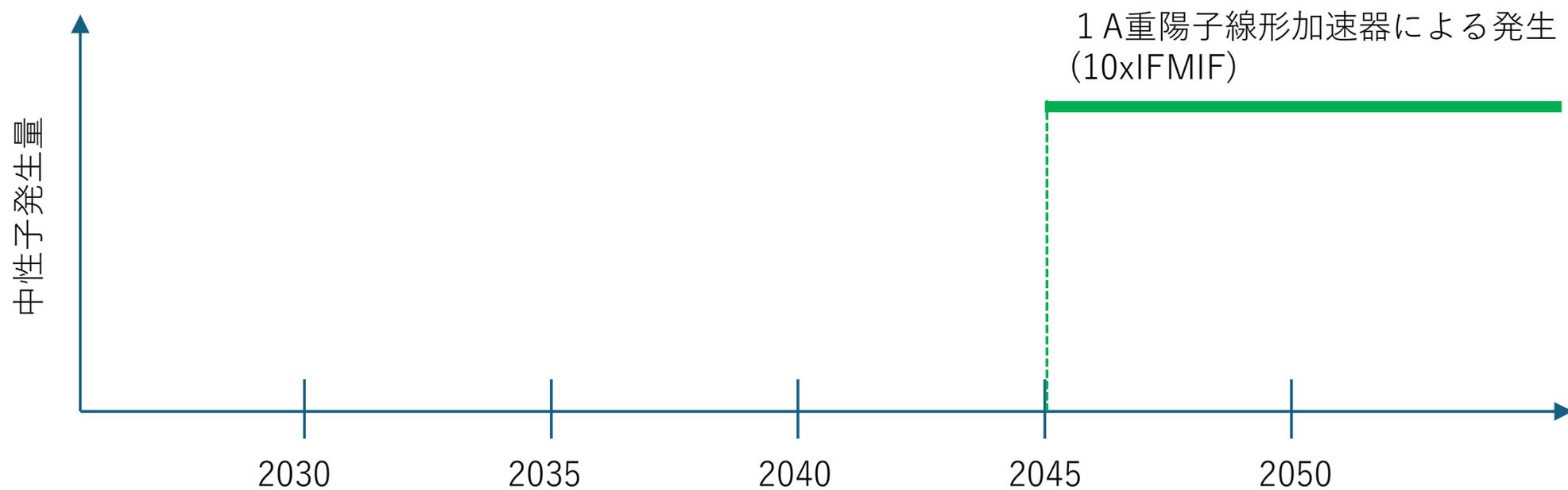


[https://www.riken.jp/press/2010/20101206\\_2/index.html](https://www.riken.jp/press/2010/20101206_2/index.html)

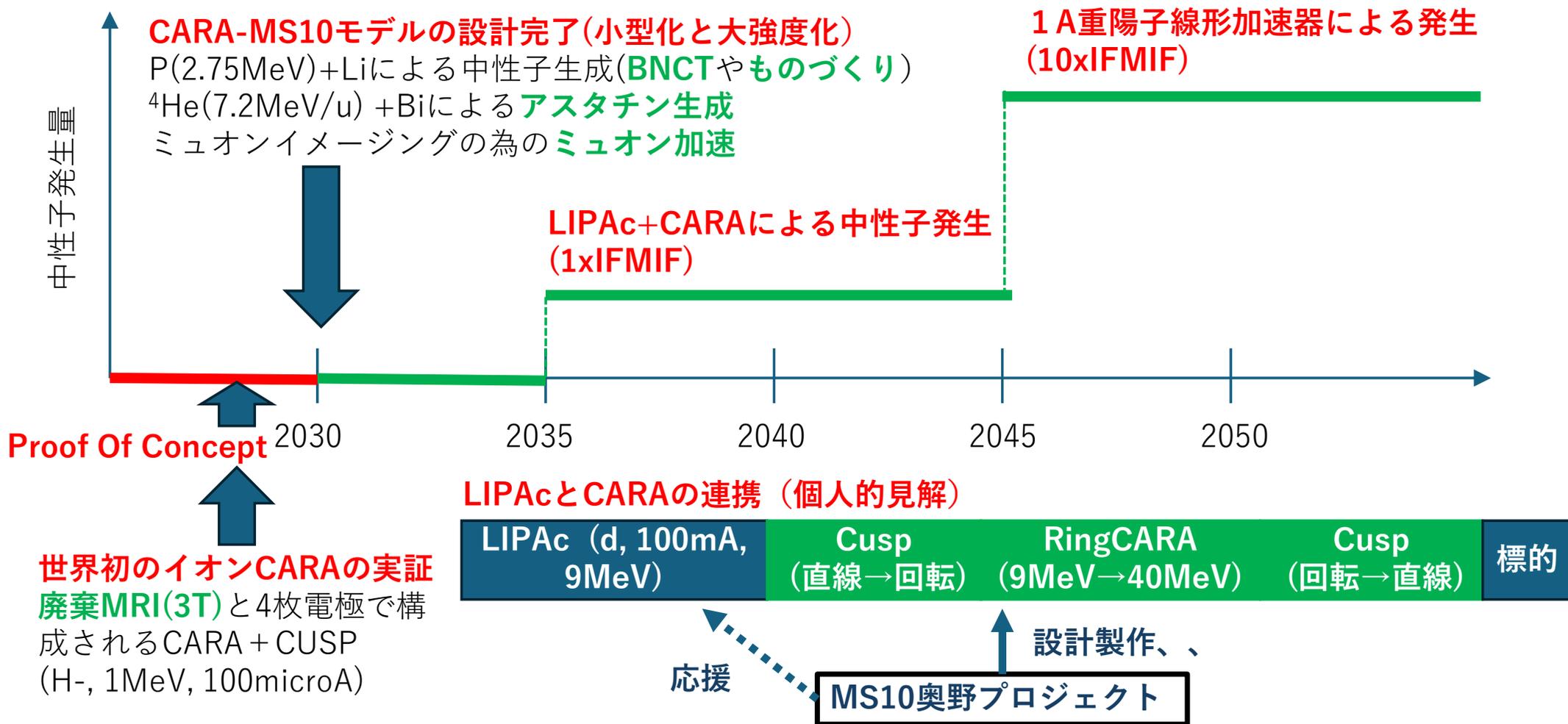
# CARAからのビーム取り出し

出願日：2025年4月16日  
出願番号：特願2025-67406  
発明者：奥野広樹、三宅泰斗

# Original計画に基づく中性子発生計画



# CARAによる中性子生成の前倒し案



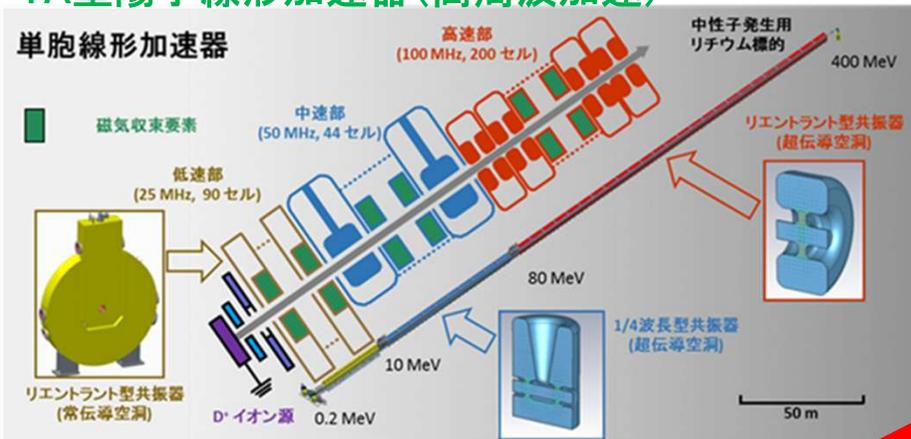
# CARAによる大口径ビーム加速(1A以上) 高エネルギーNBIの為

# 核融合分野へ貢献する加速器 (強化状況4/17現在)

貢献する加速器

期待される成果

## 1A重陽子線形加速器(高周波加速)



**高速部 (400MeV, 1A, 重陽子)**

中性子源

**(A) 核融合”燃料”の安定した生成**

高周波加速される高エネルギー重陽子のビーム強度を1A程度まで飛躍的に増強する技術の実装(高速中性子 $\rightarrow$ (n, xn)による増幅機能)

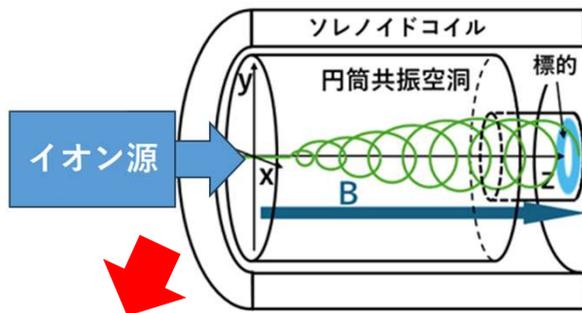
**中速部(40MeV, 1A, 重陽子)**

中性子源

**(B) 炉内材料の”中性子耐性”の評価を加速**

1A, 40MeVの重陽子ビームでIFMIF(国際核融合材料照射施設)の10倍の中性子束(量)で中性子耐性の評価を加速

## CARA(自動サイクロトロン共鳴加速器)



**低速部(2MeV, 5A, 重陽子(負イオン))**

高エネルギーNBI

**(C) 商用炉・小型炉で必要とする超高温プラズマの維持と先進フュージョンシステム**

・重陽子ビームの高周波加速により商用炉用のプラズマ加熱装置の小型化

・CARA(自動サイクロトロン共鳴加速器)+FRCによる小型炉超高温プラズマの維持  
ビーム駆動型小型フュージョンシステムの実現を目指す。

**FRC (プラズマ反転配位) への入射**

$\sigma t=3$ までいけるか?

波及 (RI製造、中性子利用、ミュオン加速)