

ムーンショット目標10

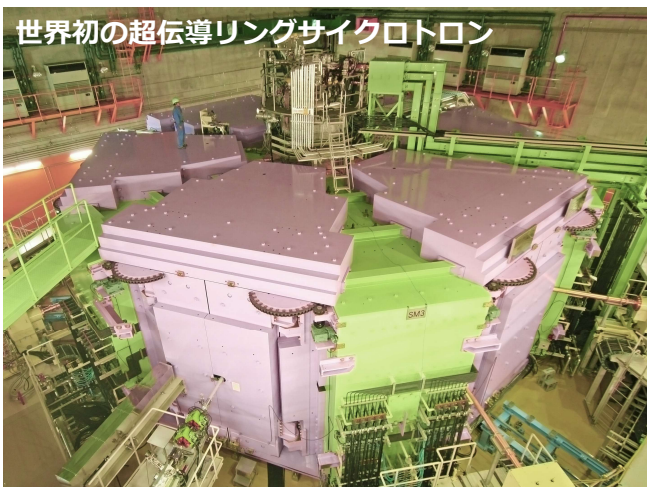
プロジェクト「革新的加速技術による大強度中性子源と 先進フュージョンシステムの開発」の紹介

プロジェクトマネージャー: 奥野広樹
理化学研究所 仁科加速器科学研究センター

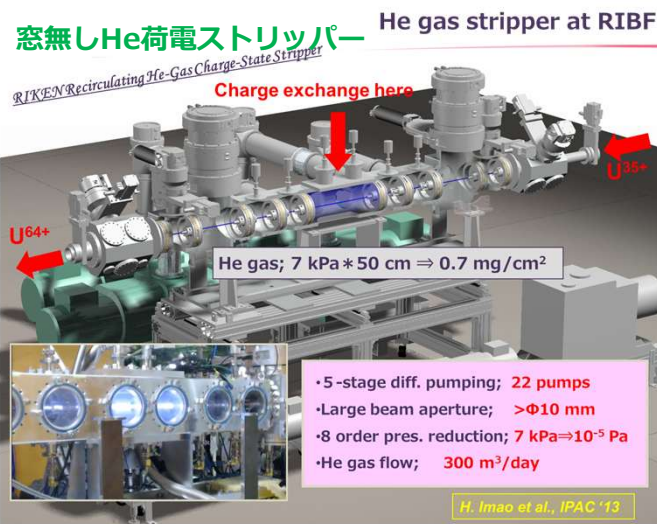
自己紹介

- 奥野広樹 (おくのひろき)
- 丙午生まれ 出身地：東京都
- 1989年： 東京大学理学部物理学卒業、大学院時の専攻：原子核物理、博士論文「入射核破砕片のスピン偏極」
- 1994年4月：理化学研究所入所～現在に至る
- 理研での仕事：加速器屋@RIビームファクトリー (サイクロトロン、超伝導磁石、荷電変換装置)

1995年～
超伝導リングサイクロトロン
の設計、開発、建設、運転
(サイクロトロン、超伝導磁
石、ヘリウム冷凍機)



2008年～
荷電変換装置の開発
(RIBFの大強度化)



社会の役に立つ加速器：

- 2015年～
高レベル放射性廃棄物の処理に関する研究
(ImPACT 藤田プログラム)
- 2021年～
核種変換によるダイヤモンドn型半導体の
開発 (キャノン財団)
- 2023年～
「日本ヘリウム循環システムの構築」
(JST PM 研修)
- 2024年～
「小型で人工的に高強度のミュオンを生成
するコア技術の開発」(JST K-program)

2024年末～ MS10PMに就任
1年間のフィジビリティスタディ中

MS10における本プロジェクトの位置づけ

- 目標：新たな加速器技術を核融合分野へ展開し、フュージョンエネルギー開発に**パラダイムシフト**を起こす。
- 技術的挑戦：加速器の**大強度化とコンパクト化**

①大強度中性子源

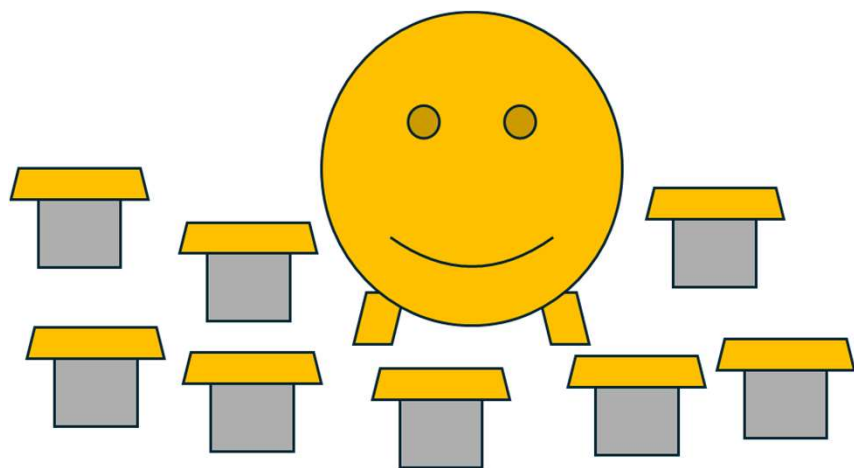
アンペア級ビームの革新的な加速器技術を確立し、現在開発が進められている核融合材料照射施設（IFMIF）の10倍に達する中性子の発生量を可能とすることで、核融合炉の材料開発を加速する。

②ビーム駆動型の核融合システム（先進フュージョンシステム）

現状の中性粒子入射ではなく、自動サイクロトロン共鳴加速器(CARA)によりリング状にジャイロ加速されたイオンを直接プラズマに入射・加熱し、ビーム駆動型の小型核融合炉の実現を目指す。

MS10において本プロジェクトが目指す社会像

- 燃料を輸入に頼らず自給できる社会
- 高レベル放射性廃棄物を増やさない社会
- 核融合炉を、安心、**安全**、信頼性のある技術として、日常生活の近くに共存できる社会
- 太陽の届かない宇宙空間や深海など、人類未踏の空間に、フュージョンエネルギーによって活動拠点を拡大できる未来。



ガスタンクと人の生活

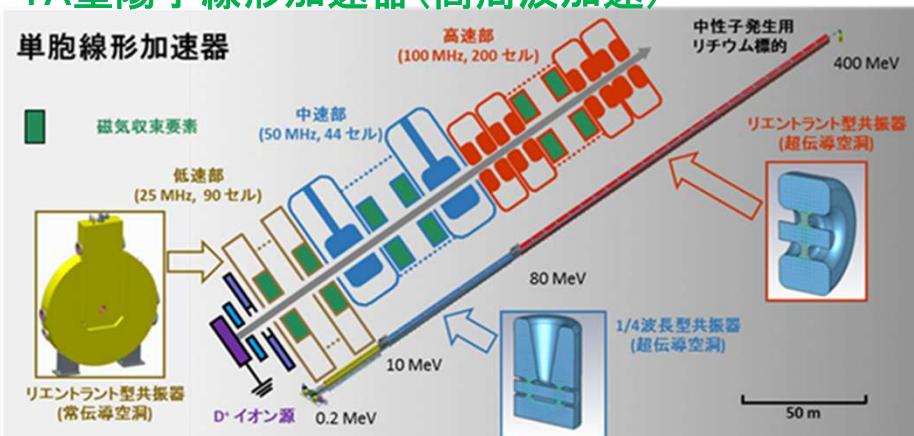
	ガスタンク	核融合炉
燃料	可燃性ガス	水素同位体
法律	高圧ガス保安法 ガスタンクの容器として使用可能な材料のリストがある。→ 法が人の生活の安全を担保している。	「核融合炉法(仮)」 炉内で使用されている 材料の中性子耐性試験は必須 となるはず。

具体的な技術と期待される成果

具体的技術

期待される成果

1A重陽子線形加速器(高周波加速)



高速部

中性子源

中速部

中性子源

低速部

高エネルギーNBI

FRC (プラズマ反転配位) への入射

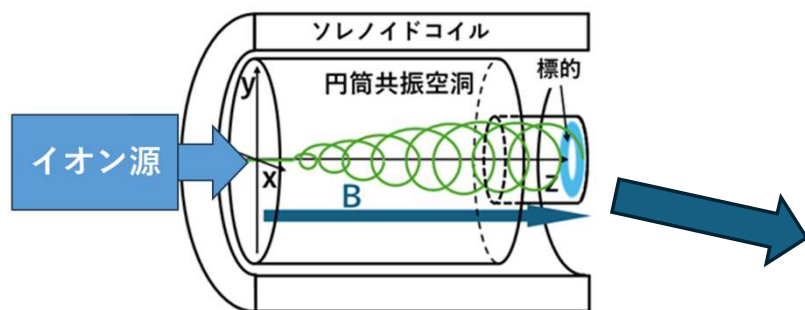
(A) 核融合”燃料”の安定した生成

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

(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)



(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

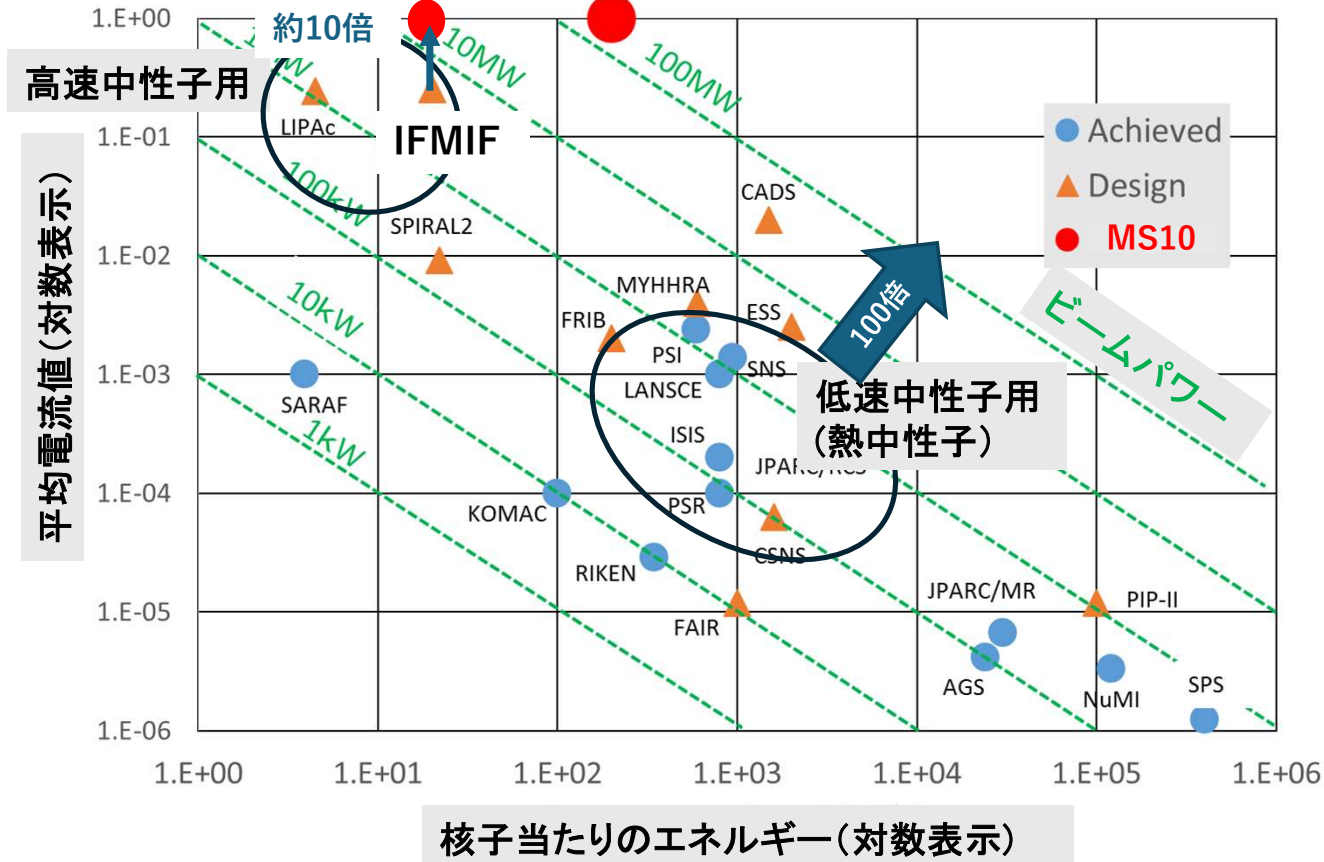
ビーム駆動型小型フュージョンシステムの実現を目指す。

加速器性能の比較

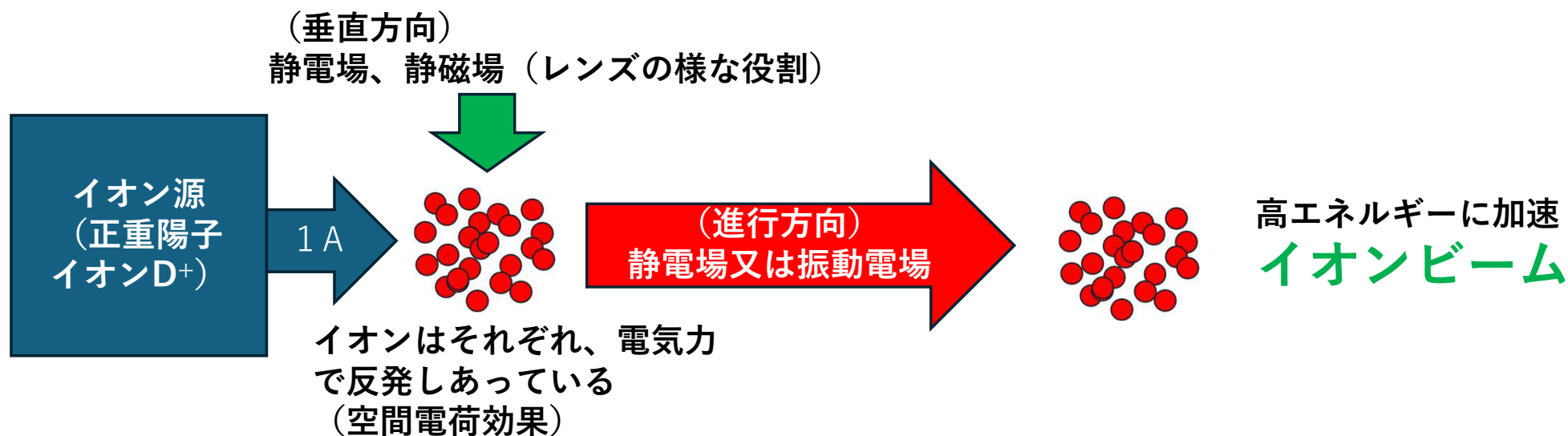
世界の加速器施設の性能

中速部まで
重陽子、1A, 40MeV

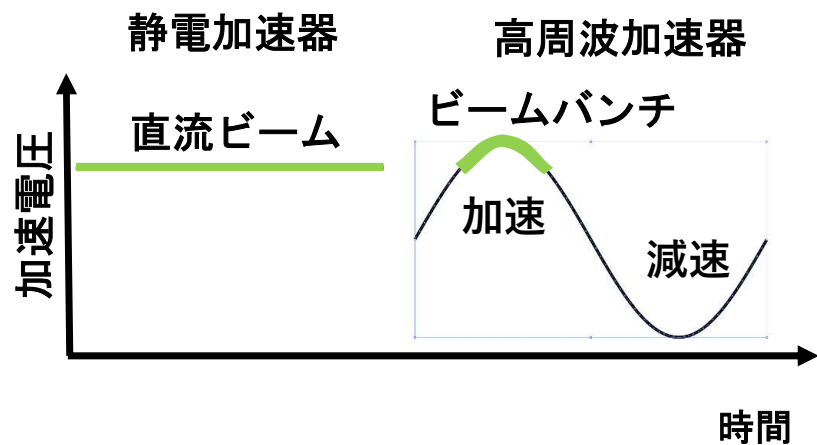
本計画の目標
(重陽子、1A, 400MeV)



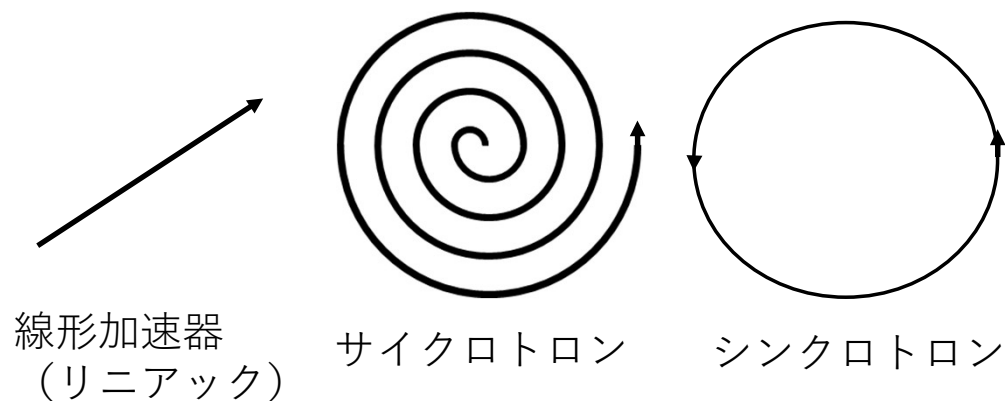
加速器 (粒子(イオン)を電氣的に加速するもの)



ビームの時間構造



高周波加速器のビーム軌道の形で分類



加速器の歴史

物理学上の出来事

静電加速器
及び
磁気誘導加速器

高周波加速器

発見・発明

年
1900—

真空放電による陰極線(1860) ~100 keV

種々の気体による電子散乱の実験(1895)
X線、α線、β線の発見

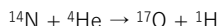
リニアック サイクロトロン シンクロトロン

1930年頃に現在活躍している各種の
加速器の原型がほとんど出揃う

ヴィドレー型線形加速器
(1930)
サイクロトロン
の等時性原理
(1932) E. Lawrence

1930

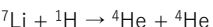
ラザフォードによる最初の原子核の
人工変換(1919)



人工核変換に必要なエネルギー⇒加速器の研究開発

ガモフによるトンネル効果の示唆(1928)
500 keVのエネルギーで通り抜けられる

コッククロフト・ワルトンによる加速器
を使った最初の原子核人工破壊(1932)



600 keV 現代原子核物理の起源
加速器の歴史の出発点

バンデグラフ
(1930)

ヴィドレー型
(1930)

サイクロトロン
(1932)

コッククロフト・
ワルトン(1932)

アルバレ型
(1946)

シンクロ
サイクロトロン
(1947)

電子
シンクロトロン
(1946)

ベータトロン
(1942)

電子ライナック
(1948)

AVF
サイクロトロン
(1958)

陽子
シンクロトロン
(1952)

1950

位相安定性
の原理
(1944)

強収束の原理
(1952)

ビーム衝突器
の提案(1956)

ブツケル博士

電子ビーム
冷却法(1966)

確率冷却法
(1972)

1980

RFQライナックリング
(1974)

サイクロトロン
(1974)

陽子・反陽子
コライダー
(1971)

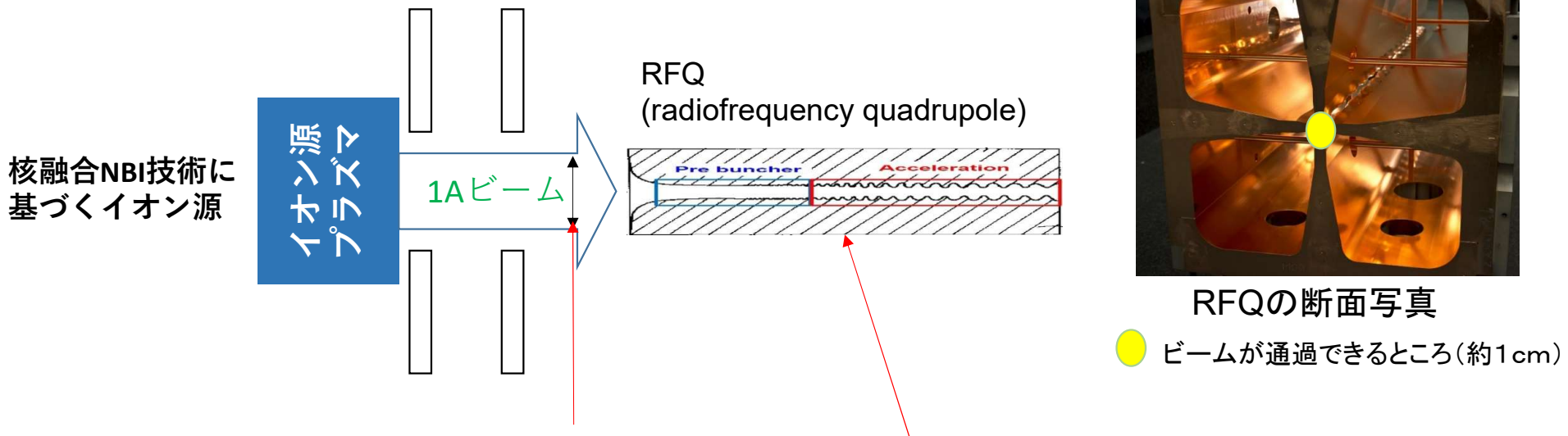
高周波加速器による高エネルギー化により、
様々なイノベーションが起きた

C. Rubia and Simon van der Meer
弱い相互作用を媒介する場の素粒子
(ウィークボゾン)の発見を導いた巨大
プロジェクトへの貢献

‘Old but New’: 「1 A級」のビームを高周波加速する事により、フュージョンエネルギー実現に貢献する

1A重陽子線形加速器 第1の壁 「RFQの口径」

既存の大強度(陽子)重陽子線形加速器の低速部には、RFQ(高周波四重極)加速器が広く使われている。RFQはイオン源からの直流ビームのバンチ化、ビームの収束発散、加速を電場により行う。



1Aビームのサイズ $> 10\text{cm}\phi \gg 1\text{cm}\phi$: RFQのアクセプタンス

RFQが使えない! (RFQで径を10cmまで増やすと容易に放電する)

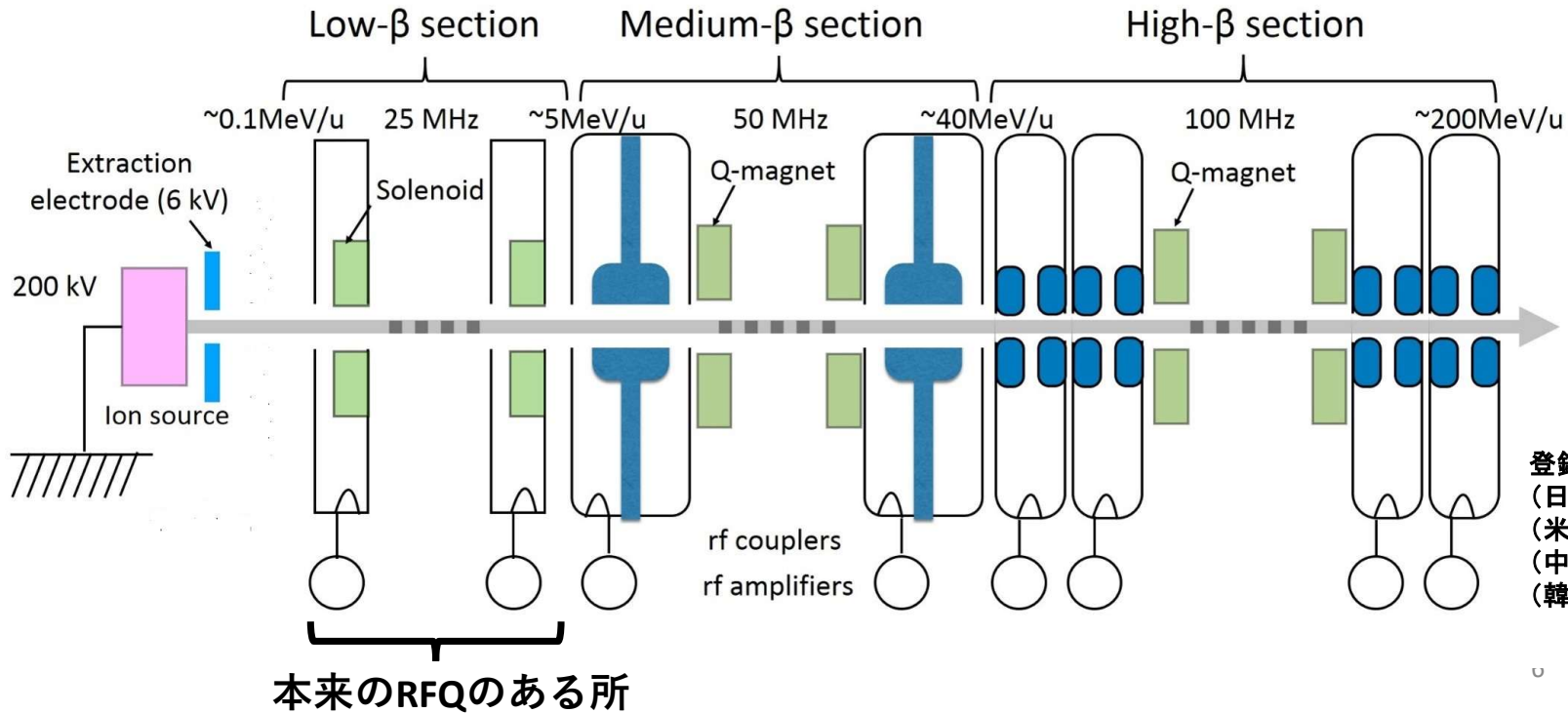
課題: RFQに替わる大口径ビームの加速を可能にする低速部の開発

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)

1A重陽子線形加速器の主要課題と解決方法

課題1: 大口径ビームの高周波加速を可能にする低速部の開発

解決方法: RFQに替わる低速部の開発→直流ビームを高周波加速できるバンチ化された状態を実証。

課題2: ビーム損失率(10^{-8})の要求の実現 ← 最大ビームパワーを制限する。

1W/mの要求を実現するビームハローの新しい解析手法の開発

課題3: イオン源から1Aの重陽子ビームを引き出し、後段加速器に入射できるビームの質である事を実証する。

解決方法: イオン源を作成し、テストベンチにて試験を行い、引き出されたビームの質を測定。

課題4: 中速部、高速部の超伝導加速共振器の大口径化、ハイパワー化

解決方法: 実証機を1台ずつ製作し性能確認(製作方法、表面処理等がダイレクトに性能に効く)

課題5: 標的のアイデアを概念設計の段階へ進める。/三重水素生成効率の向上

解決方法5: 課題を抽出して、解決方法を見出す。/標的の材料、配置を工夫して三重水素生成効率を向上させる。

課題6: 電気効率の向上

解決方法6: 次世代パワー半導体を用いた高周波アンプを取りいれて、電気効率の向上を目指す。

解決方法6: 高周波アンプ内に電気回収機構をつける事により電気効率の向上を目指す。

.....



典型的なビームハローの図
(ビーム自身の空間電荷力や
加速器内の非線形性から生じる)

1A重陽子線形加速器の使い途

1A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

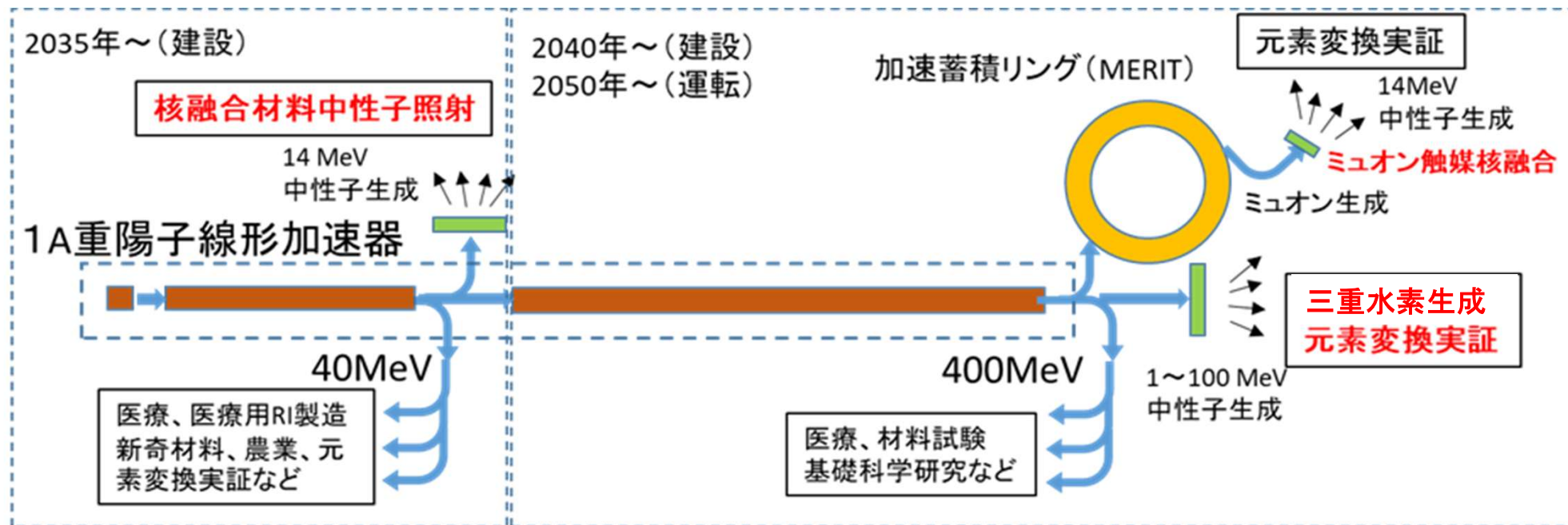
アウトカム：

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

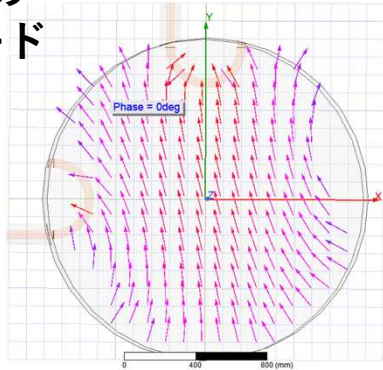
ミュオン触媒核融合の開発基盤提供

高レベル放射性廃棄物の処理（実証）



CARA自動サイクロトロン共鳴加速器

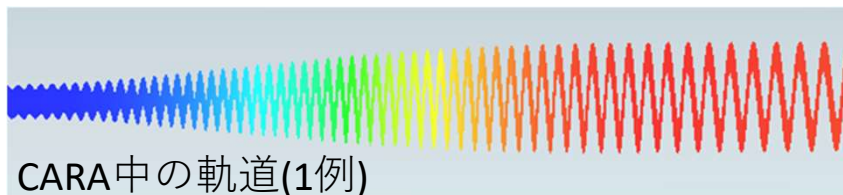
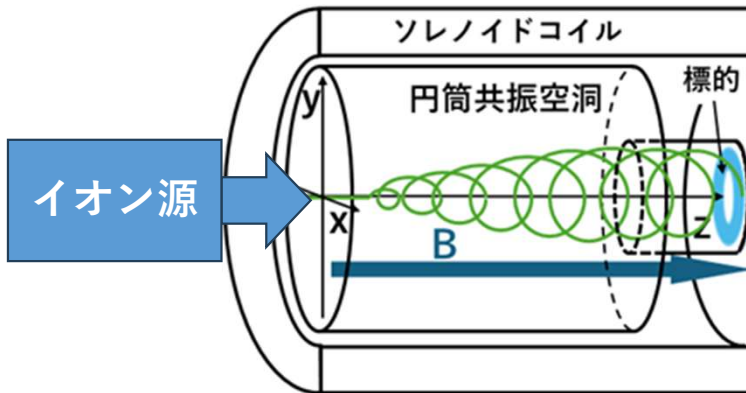
共振器内の
TE111モード



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)

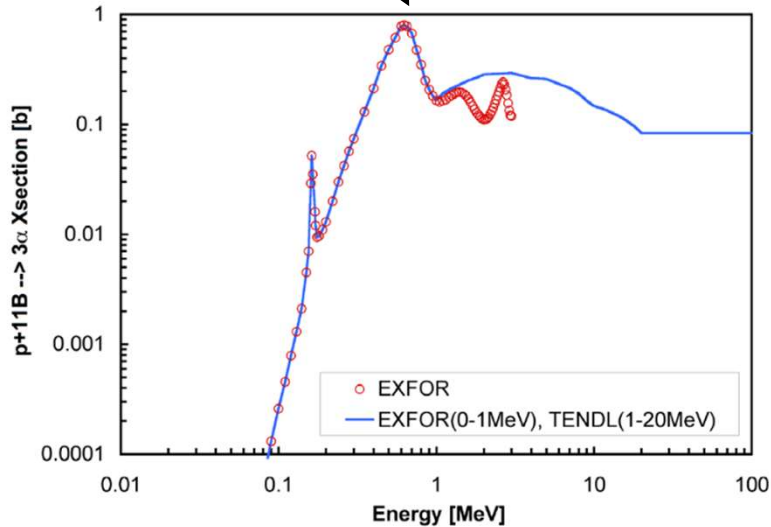
- 低エネルギー部の空間電荷の集中を緩和できる
- 直流ビームのまま加速できる(空間電荷力の緩和)
- 取り出しを前提としていない。(内部標的)
- 軌道形状がコンパクト。運動エネルギーの向きが円の接線方向。

CARAの用途 (一例)

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

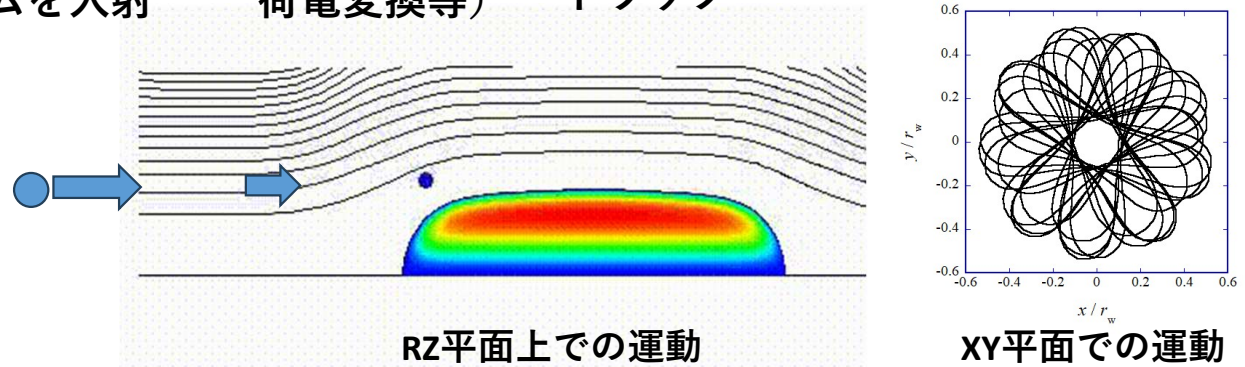
陽子 + $^{11}\text{B} \rightarrow 3\ ^4\text{He}$ の断面積

600keV 1Bahn



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

CARAからの
ビームを入射 → (減速、
荷電変換等) → FRC内に
トラップ

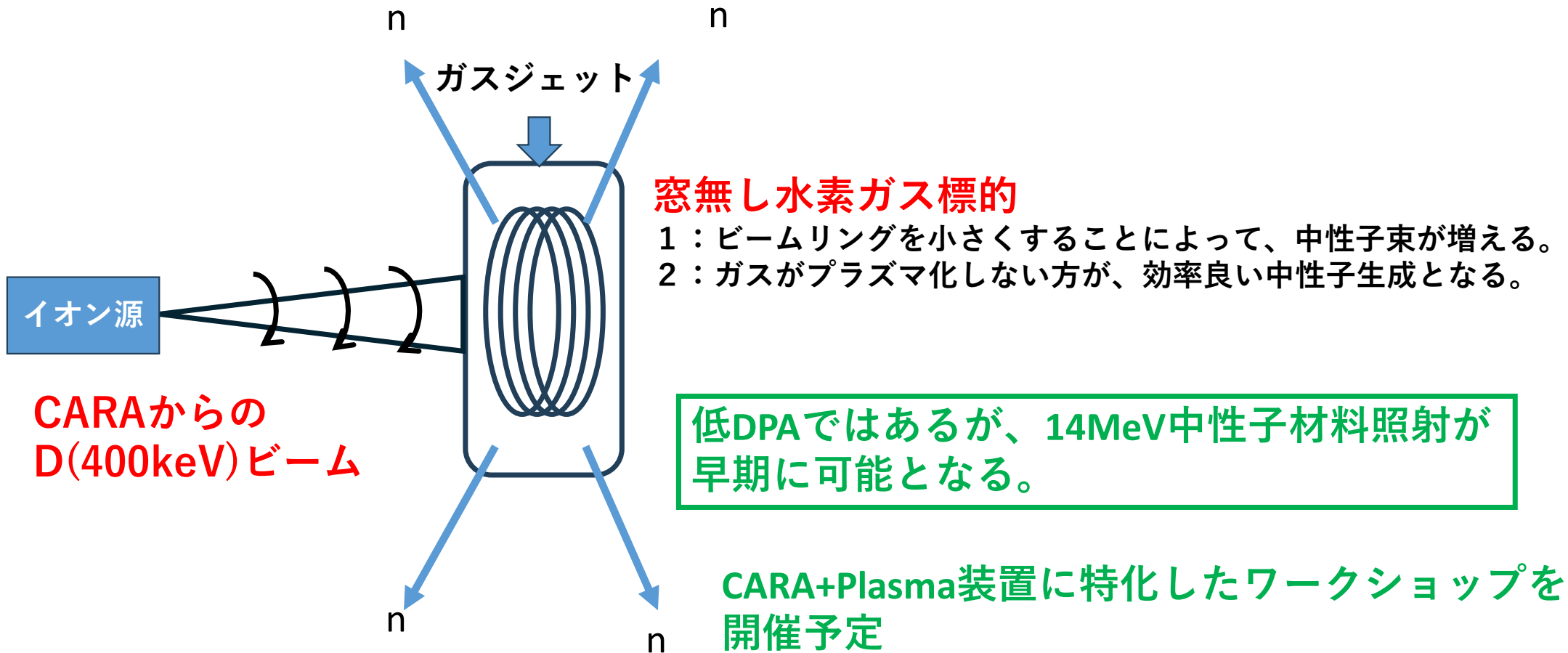


CARAとFRCプラズマ装置を接続したビームシミュレーションを開発中

CARA+Plasma装置に特化したワークショップを開催予定

CARAの用途（一例）

DT反応による14MeV中性子源



研究体制案

社会実装



挑戦的な活用法

アドバイザー：
KEK 高山健先生
京都大学 岸本泰明先生

フィジビリティスタディ
オープンな議論 (核融合分野、ビーム物理分野、素粒子・原子核分野)
1 A重陽子線形加速器及びCARA+プラズマ装置内のビームシミュレーション

星PJとの連携：
「新しい加速器設計のための
ビームシミュレーション」
木須PJとの連携：
「加速器内の高磁場ソレノイド開発」

適切な目標
パラメタ等

他の加速方式
との比較

革新的加速技術の開発

1 A重陽子線形加速器

自動サイクロトロン共鳴加速器 (CARA)

システム評価

イオン源

低速部

中高速部

標的関連課題

三重水素回収・取り扱い

軌道計算

概念設計

簡易CARA

CARA共振器開発

高磁場ソレノイド

プラズマ蓄積装置

今後のスケジュール

MS10奥野プロジェクトキックオフワークショップ

「核融合分野に貢献する加速器の仕様と実現可能性」

(仕様：イオン種、エネルギー、電流値)

目的：

- ・ 核融合分野の方々からのビームの使い途及び加速パラメータについてコメントを頂くと共に、加速器分野の方々からのコメントを頂き、オープンな議論を行う。
- ・ 他の加速方式との比較
- ・ 核融合分野から加速器開発への参画を募集
 - ・ イオン源（NBI装置）
 - ・ ハイパワー高周波源試験環境

日時：2025年4月17日、JST東京本部別館（K's五番町） 1階ホール、10時～16時、ハイブリッド)

ホームページ（2月14日午後7時頃公開予定）：<https://indico2.riken.jp/event/5142/>

依頼事項：

次頁の「加速器の用途とビームとパラメータ」に対するコメントを、ワークショップで発表していただく、または、事前に電子メール(ms10okunoproject@ml.riken.jp)を頂きたく宜しくお願いします。頂いたコメントはワークショップ内で全て公表させて頂きます。他の加速方式の提案も歓迎します。

加速器の用途とビームパラメータ（議論用）

1: 1A重イオン線形加速器

出口	イオン種	エネルギー (MeV)	電流値(A)	標的	使う部位
初期充填用三重水素生成	重陽子	400	1	液体リチウム	低中高
IFMIFを超える中性子照射施設（材料、高温SC、ブランケット）	重陽子	40	1	液体リチウム	低中
高周波加速型高エネルギーNBI	重陽子	2	5~10	プラズマ	低
DT稼働初期のブランケットへの中性子直接入射	陽子イオン	2.7	5~10	液体リチウム	低
ミュオン触媒核融合	重陽子	400以上	0.1?	MERIT	低中高
高レベル放射性廃棄物の大幅な減容	重陽子	400	1	液体リチウム	低中高
BNCT、ヘリウム生成材料試験	陽子	2.7	1	液体リチウム	低
211At製造	ヘリウム4	29	1	液体ビスマス	低

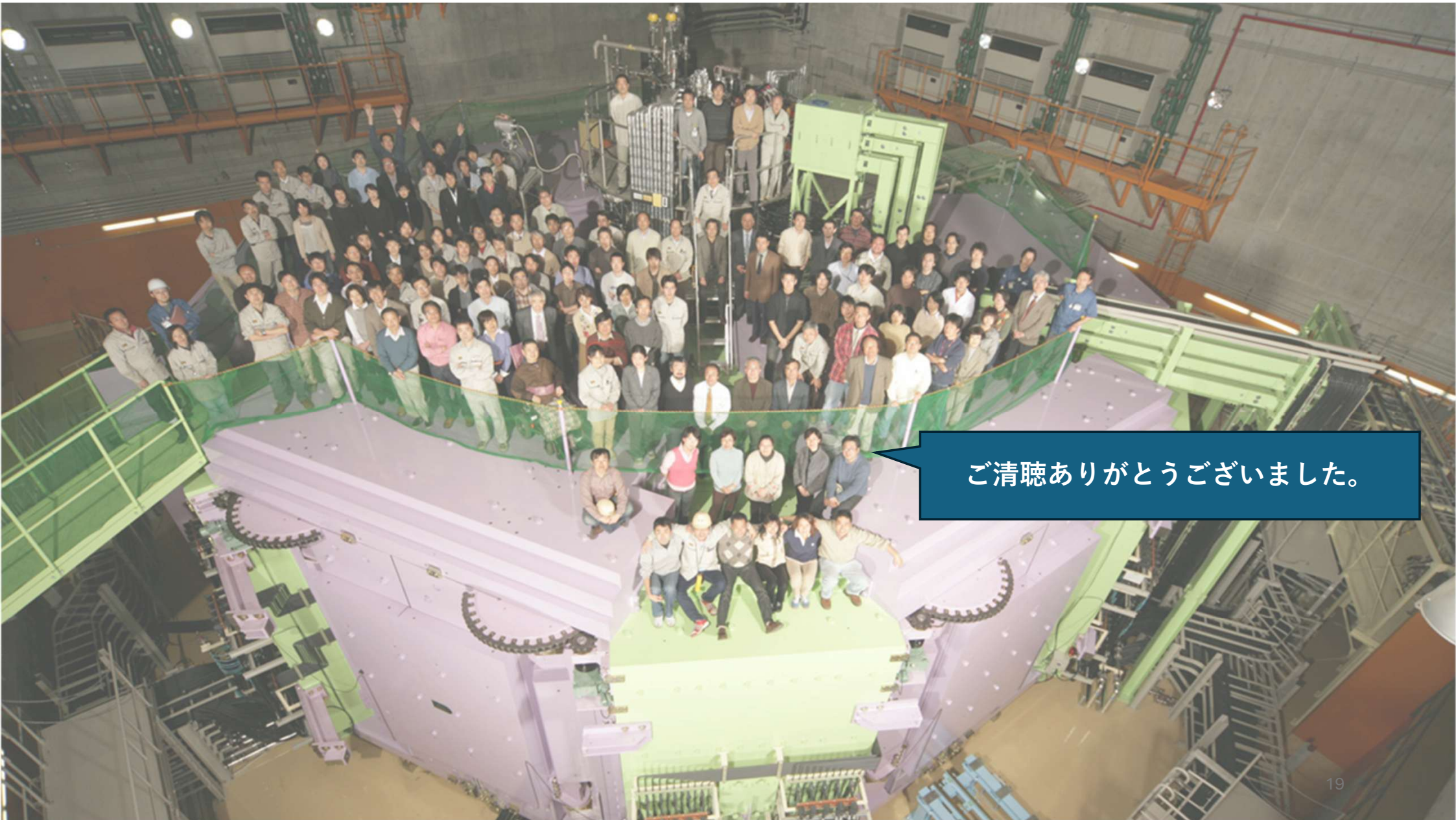
2: CARA

水素FRCに高速ボロンを入射する	11B	11	1以上	FRC	
三重水素無でDT炉を駆動する為のDD運転の支援	重陽子	10	1以上	Dガス	
三重水素無でDT炉を駆動する為のDD運転の支援	陽子	2.7	1以上	液体リチウム	
14MeV中性子発生と材料照射	重陽子	0.4	1A以上	Tガス	
エネルギー変換器（減速機）	ヘリウム4				
BNCT、ヘリウム生成材料試験	陽子	2.7	1	液体リチウム	
211At製造	ヘリウム4	29	1	液体ビスマス	

採択時に想定したもの（核融合分野への貢献）

採択後に付け加えられたもの（核融合分野への貢献）

他分野への応用



ご清聴ありがとうございました。