ムーンショット目標10



2025/01/0

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

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。

研究ポートフォリオ

MS10

フュージョンエネルギーの社会実装に向けた、 4つの研究開発カテゴリーを想定

- 1. 主路線(トカマク型核融合炉によってベースロード電源を実現)を加速するイノベーション
- 2. 主路線以外の革新的核融合炉方式によって多様な用途のエネルギープラントを実現するイノベーション
- 3. 核融合反応をエネルギープラント以外に応用する技術のイノベーション
- 4. フュージョンエネルギーの要素技術を他の分野に応用するスピンアウト型の社会実装



MS10が生み出すイノベーション

横型のプロジェクトから、 縦展によって、社会実装 の 具体的な成果を生む。



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。

核融合炉は空にならず、 安定に核融合燃料が充填 されている



14MeV中性子試験によって耐性 への信頼性が担保された容器やブ ランケット

ガスタンク(高圧ガス保安法)と人の生活

具体的な技術と期待される成果

期待される成果

具体的技術



加速器性能の比較



加速器(粒子(イオン)を電気的に加速するもの)



加速器の歴史



'Old but New':「1A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>10cmφ >> 1cmφ: 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、大口径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



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:標的のアイディ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)

コア

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



CARA自動サイクロトロン共鳴加速器



CARA中の軌道(1例)

サイクロトロン周波数 $\omega = \frac{\upsilon}{a} = \frac{dB}{dB}$ サイクロトロン周波数=共振周波数 ρ т →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の使途 (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



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

CARA+Plasma装置に特化したワークショップを 開催予定

CARAの使途(一例)

DT反応による14MeV中性子源



プラズマ中でのエネルギーロス





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
- ・核融合分野等から加速器開発への参画を募集(公募ではない)
 - ・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):<u>https://indico2.riken.jp/event/5142/</u> **依頼事項:**

次頁の「加速器の使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(<u>ms10okunoproject@ml.riken.jp</u>)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。

18

必要なイオン源と議論のポイント

- 1:イオン種:D(正負イオン)電流値:約0.1~1A
- 2:エミッタンス(ノーマライズド、RMS): 25 mm mrad
- 3:ハロー無のビームプロファイル(完全にビームが切れるスリット)
- 4:イオン源のタイプ:フィラメントタイプかRFタイプかECRか (安定性、エネルギー巾)
- 5:メリスカスの制御(永遠のテーマ)

(将来的には。。) ボロンの 5 価を大量に出すイオン源 トリチウムのイオン源

ハロー形成のメカニズム

イオン源からのエミッタンス



 $1.5A/(\pi \text{ cm mrad}) \times 2.5\pi \text{ cm mrad}$ =3.75 A

Cf. IFMIF 0.25 π mm mrad $1.5A/(\pi \text{ cm mrad}) \times 0.025 \pi \text{ cm mrad}$ =0.0375 A

ビームの絞りすぎは危険?

VOLUME 57, NUMBER 5

PHYSICAL REVIEW E

Self-consistent distribution of a high brightness beam in a continuous focusing channel and application to halo-free beam transport

Yuri K. Batygin The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Hirosawa 2-1, Wako-shi, Saitama 351-01, Japan (Received 2 October 1997)

The self-consistent particle distribution of a high brightness beam in a uniform channel with arbitrary focusing potential is derived. It is shown that the self-potential of a space-charge dominated beam always tends to the same distribution as an external focusing potential with opposite sign regardless of the applied focusing field. Subsequent approximation formulas to the space charge potential of the beam have been derived, which demonstrates the effect of shielding of the external field. The developed approach is checked via known solution as a Gaussian beam distribution matched with a nonlinear focusing channel. The performed study provides a theoretical basis for choosing parameters of the space charge dominated beam transport with suppressed emittance growth. Numerical results demonstrating prevention of halo formation for a bright, nonuniform beam, with a phase space density value of 1.5 A/(π cm mrad) are given. [S1063-651X(98)12205-5]

Numerical Results demonstrating prevention of halo formation for a bright, nonuniform beam, with a phase space density value of 1.5 A/(π cm mrad) are given



加速器の使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				21	

