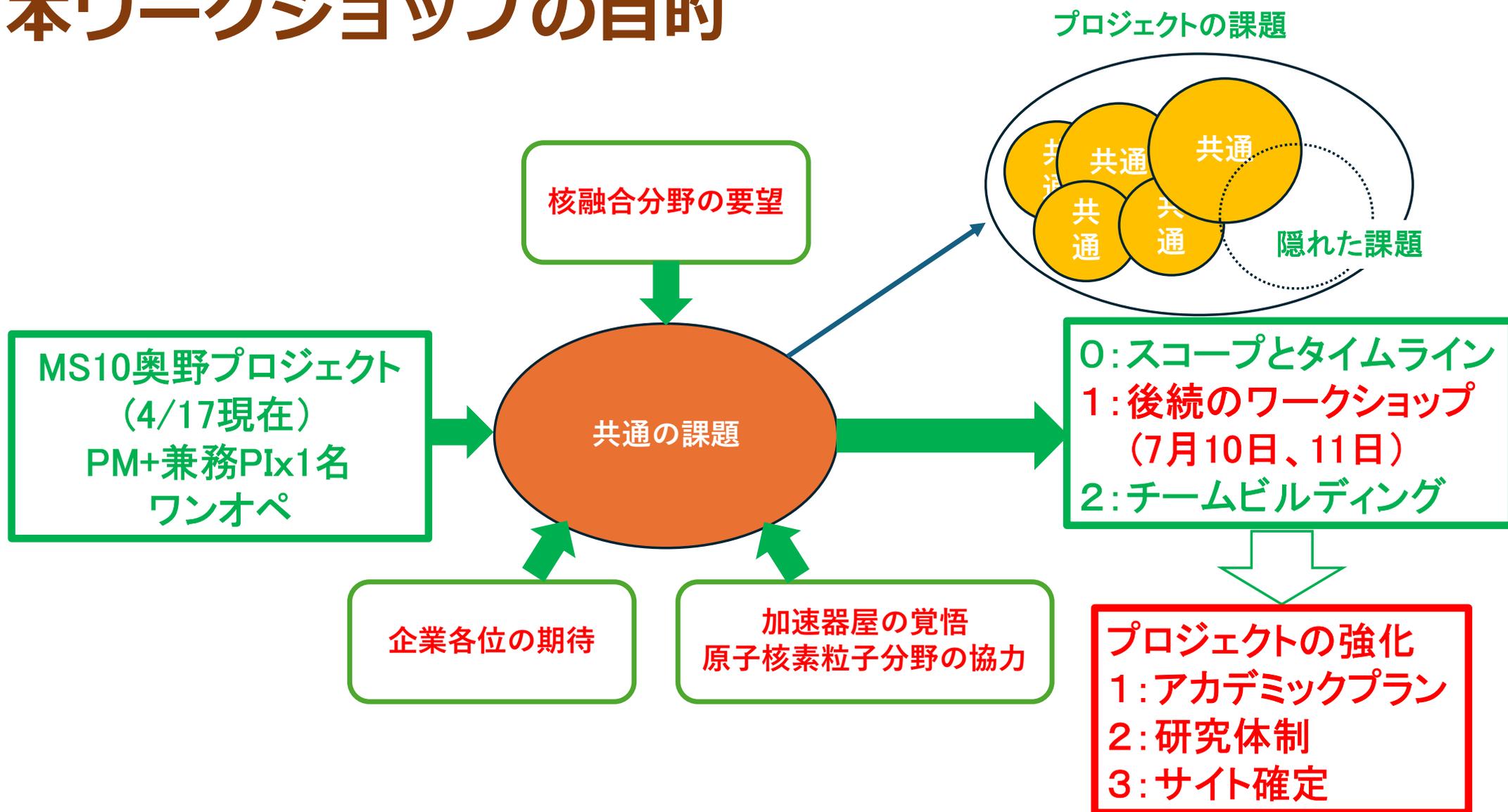


プロジェクトの現状

「核融合分野に貢献する1 A重陽子線形加速器とCARA加速器の実現可能性」(ムーンショット目標10奥野プロジェクトワークショップ夏の陣)

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

本ワークショップの目的



プロジェクト概要

4. プロジェクトが狙うアウトプット&アウトカム



MS10が生み出すイノベーション

	エネルギーシステム	核融合反応の 多面的な利用	他分野での 社会実装
MS10 PJ	主路線の 加速	主路線以外 の可能性追求	発電以外の 多様な応用
星PJ デジタル プラットフォーム	バーチャル (V) トカマク AI材料開発	Vレーザー核融合 Vビーム核融合	V中性子源
奥野PJ 高周波加速器	材料照射試験 10×IFMIF トリチウム生成	ビーム核融合	高強度中性子源 医療用アイソトープ
木須PJ 超伝導コイル	コンパクト トカマク	新型核融合 システム	AI physics DFFT 核廃棄物 消滅処理 MRI 超伝導送電

奥野プロジェクトの担うもの

- トリチウム生成
- 中性子材料照射試験 (IFMIFの10倍)
- ビーム核融合
- 高強度中性子源
- 医療用アイソトープ
- 核廃棄物消滅処理

これらの需要については、4月17日のキック
オフワークショップでじっくりとお話を聞く事が
出来ました。

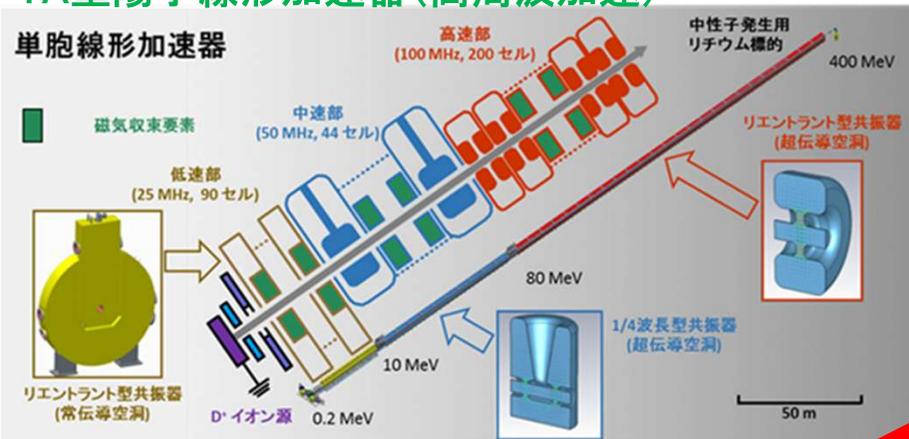
核融合分野へ貢献する加速器 (強化状況7/8 現在)

貢献する加速器

期待される成果

高温ガス炉型ADS

1A重陽子線形加速器(高周波加速)



高速部 (400MeV, 0.1A, 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)

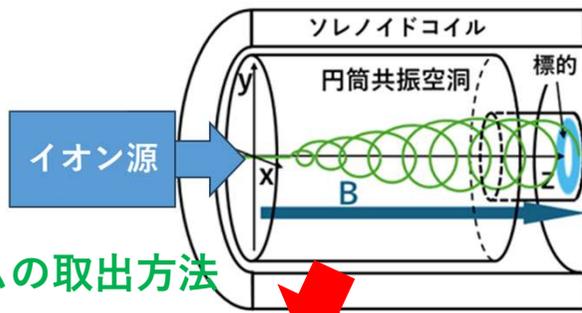
中速部(40MeV, 1A, 重陽子)

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tron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

FRC (プラズマ反転配位) への入射

- CARA(自動サイクロtron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。

$\sigma t = 3$ までいけるか?

ビームの取出方法

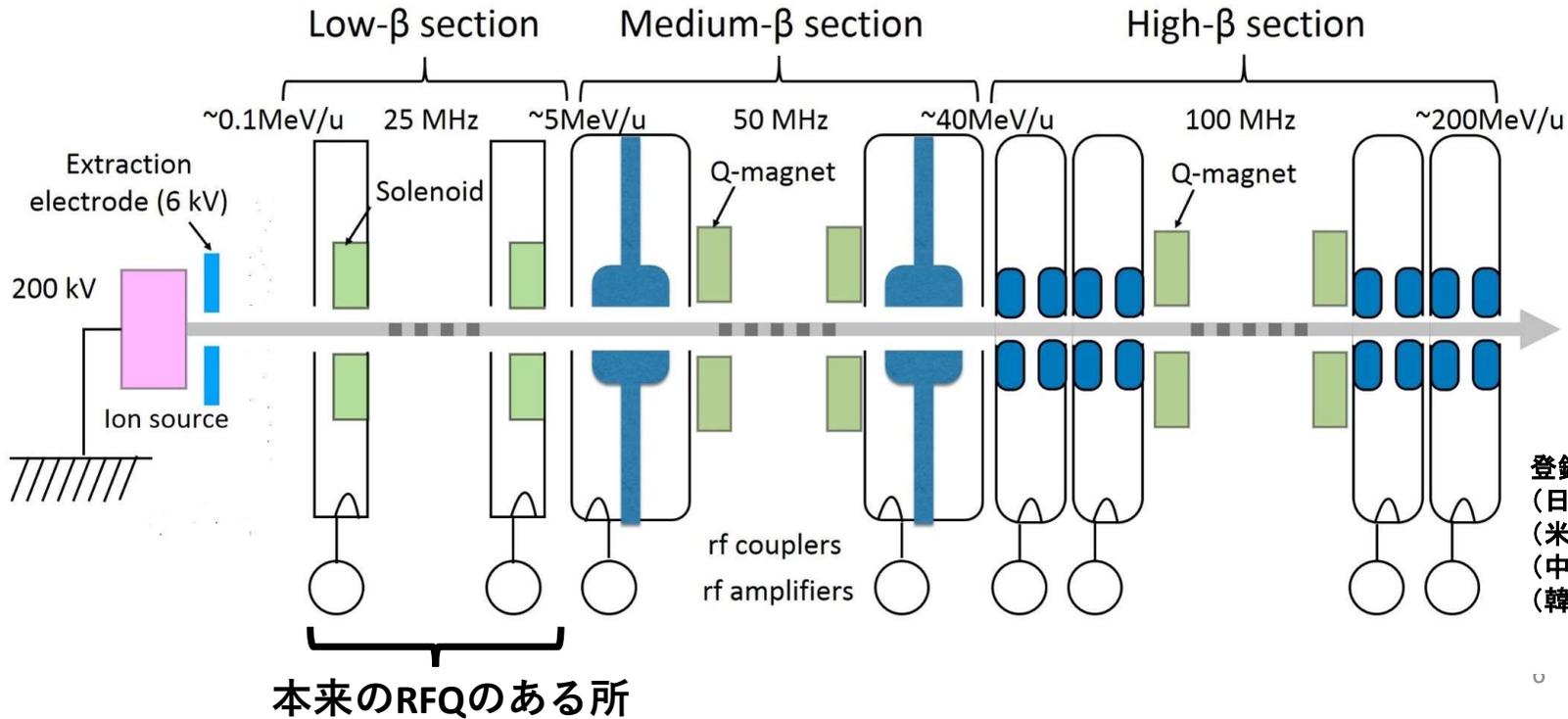
波及 (RI製造、中性子利用、ミュオン加速)

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

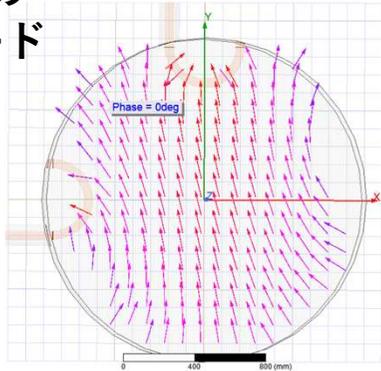
- 1: 放電のリスクの無い磁石集束素子を使用しているため、**大口徑ビーム**を受けることができる。
- 2: ビームサイズが大きいため電流密度が低く、**空間電荷力が緩和される**。
- 3: **各セルの電圧と位相を独立に選択**できるため、縦方向の空間電荷の影響を補正でき、RFQ入射部のような**DCビーム**に対して**効率的なバンチング機能**を実現できる



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

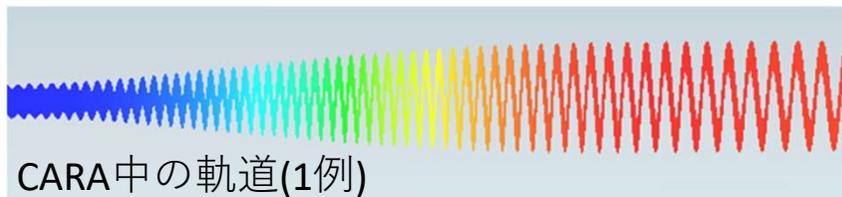
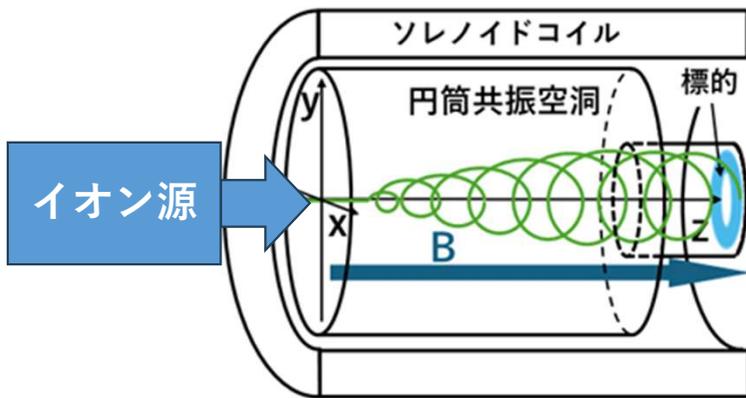
共振器内の
TE111モード



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。

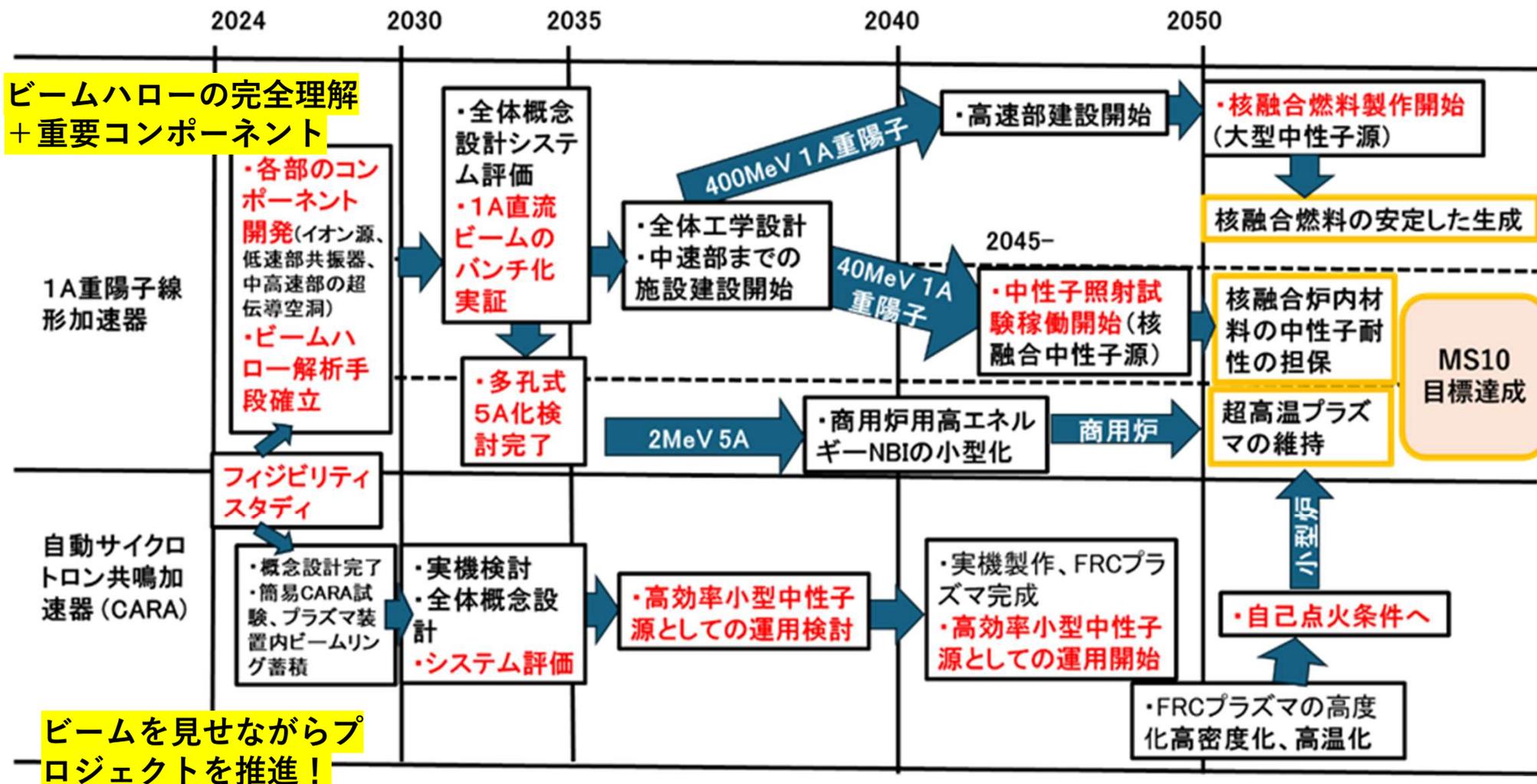


- 2000年代、Yale大のHirshfield等により提案された。その時の加速エネルギーは**1GeV**。
- 巨大かつ高磁場のソレノイドが必要なため、実現に至っていない。(電子では実証済み)
- 本プロジェクトでは、**最大1MeV程度(非相対論領域)**を目指す。

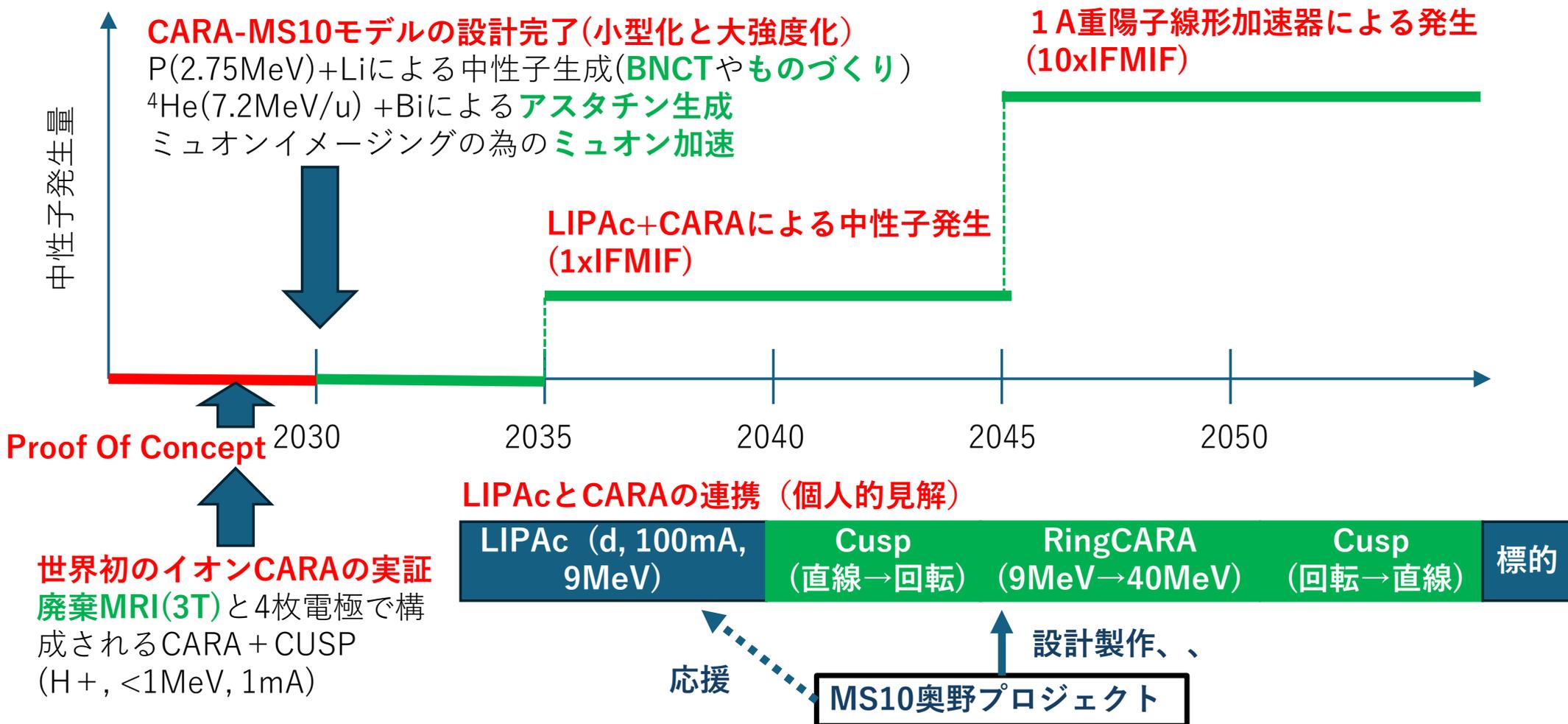
(特徴)

- 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。

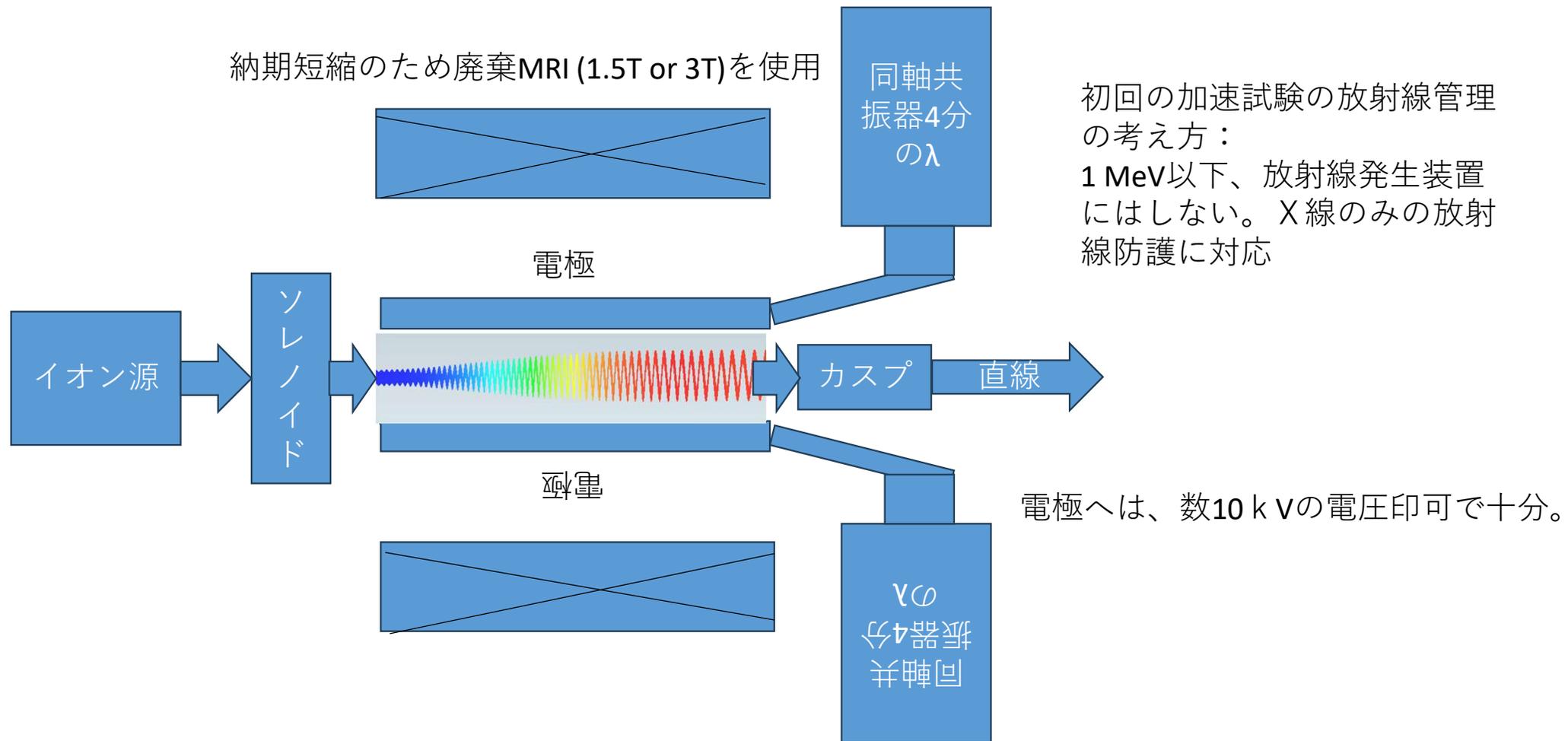
ロードマップ



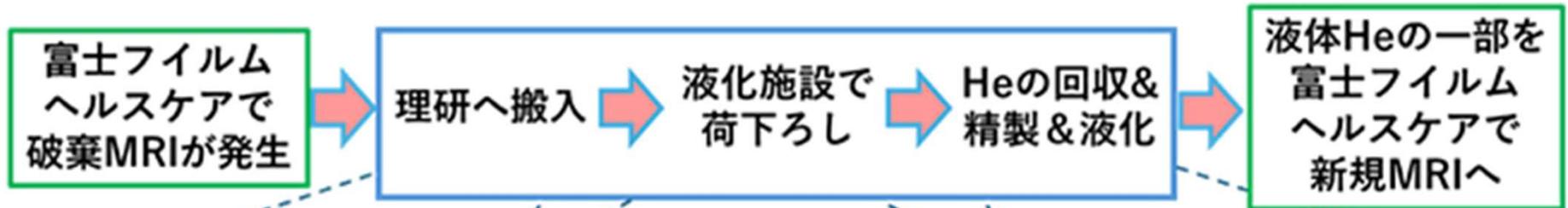
CARAによる中性子生成の前倒し案



Ion CARA実証試験のセットアップ



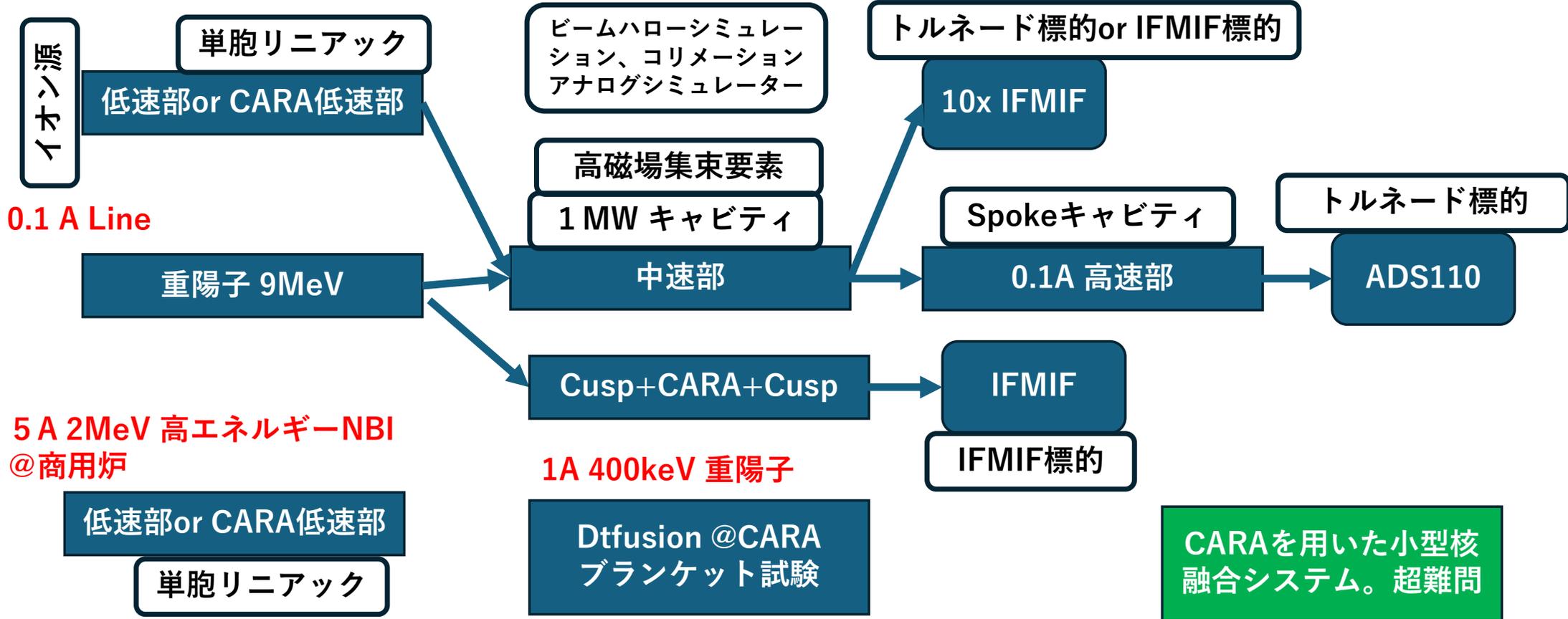
廃棄MRIの調達



捨てられるMRI

加速器の将来図 with 必要な技術

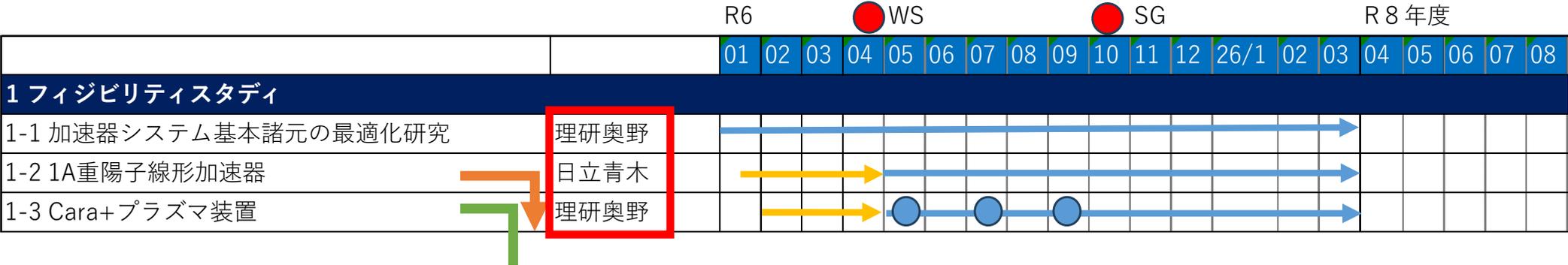
1 A Line



CARAの多分野への社会実装

RI(アスタチン)製造、小型中性子源 (モノづくり、インフラ診断、NTD)、同時多人数BNCT、核物理用RI減速機、ミュオンイメージング用加速器

PI状況 推進体制と具体的責任範囲



PI選定の予定(案)

2 1 A 重陽子線形加速器
2-1 1 A重陽子線形加速器CDR作成
2-2 ビーム制御技術の開発
'2-2-1 ハロー解析(大規模PICベース)
'2-2-2 Alternative to PIC(解析的手法) FS
'2-2-3 Alternative to PIC (シュレディンガー方程式) FS
'2-2-4 Alternative to PIC (particle core) FS
'2-2-5 Analog Simulator の開発 FS
'2-2-6 ビームコリメーションの開発
2-3 1 Aイオン源の研究開発
'2-3-1 1Aイオン源のビーム実証(CARA実証サイトを兼ねる)
'2-3-2 イオン源研究 (RForFA, 同位体効果)
2-4 低速部共振器
2-5 中高速部共振器
2-6 先進半導体を用いた小型高周波アンプ
2-7 磁気集束要素 (CARA用要素開発も兼ねる)
2-8 標的の開発

3 自動サイクロロン共鳴加速器CARAの開発
3-1 CARA CDR作成
3-2 イオンCARA実証試験
3-3 イオンCARAの高度化 (高エネルギー化、大強度化)
3-4 σt 研究会 (FS)



アナログシミュレーターのイメージ

リアルな 1 A重陽子線形加速器

1A重陽子線形加速器のビームシミュレーション

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

1A重陽子線形加速器のビームシミュレーション

1A重陽子線形加速器のビームシミュレーション状況	日立 青木孝道 13:20 - 13:40
LIPAcでのハローシミュレーションに関するアイデア(仮)	QST六ヶ所 水野明彦 13:40 - 14:00
LIPAcでのパーティクルコアモデル(仮)	QST六ヶ所 姥沢貴 14:00 - 14:20
機械学習でビームシミュレーション(仮)	SHI Defranco Andrea 14:20 - 14:40
J-PARC Linacのビームコミッショニング	KEK/J-PARC Liu Yong 14:40 - 15:00

J-PARC RCSのビームコミッショニング	JAEA/J-PARC Saha Pranab 15:00 - 15:20
J-PARC リニアックからRCSへの大強度ビーム入射調整に関する最近の進捗	JAEA/J-PARC 岡部晃大 15:20 - 15:40
J-PARC MRのビームコミッショニング	KEK/J-PARC 安居孝晃 15:40 - 16:00
大強度ハドロン線形加速器の基本的な物理設計方針	広大 岡本宏己 16:00 - 16:20
ESSリニアックにおけるビームロスシミュレーションとMEBTでのコリメーション検討	ESS 宮本量一 16:20 - 16:40
単胞空洞リニアックのPICビームシミュレーション	京大 森義治 16:40 - 17:00
Betatron Halo evolution	KEK 高山健 17:00 - 17:10
Conceptual Evaluation of a 'Giant RFQ' for Use in a 1A-Class Accelerator	理研 上垣外修一 17:10 - 17:35

17:00

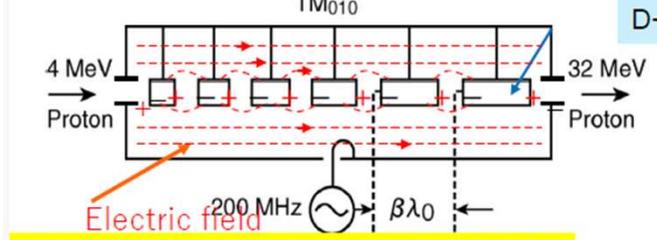
- 1 : 青木PI
- 2 : LIPAc関係
- 3 : J-PARC関係
- 4 : 広大岡本先生
- 5 : ESS
- 6 : 京大森先生 (単胞リニアック)
- 7 : 高山先生
- 8 : ジャイアントRFQby 上垣外さん

4月17日のキックオフワークショップにおける高山先生のスライド

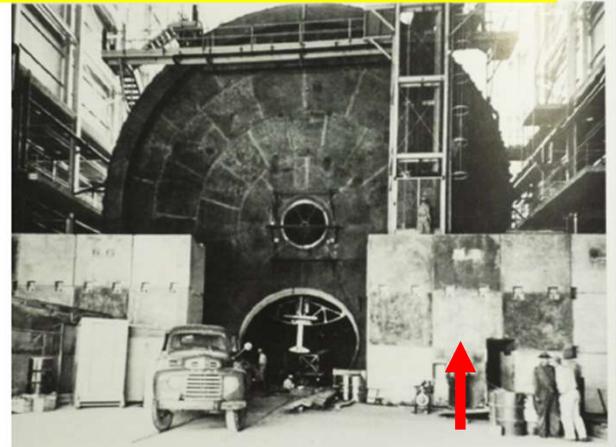
奥野加速器シナリオの歴史的的位置付け(大電流ビームに対する低速域でのSingle Cell Cavity Linacの可能性を問う)

Alvarez Linac at LBL in 1947 by Alvarez and Panofsky

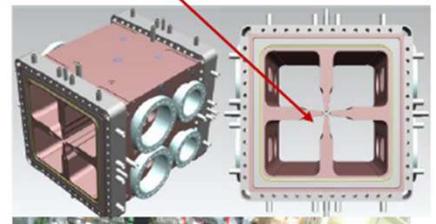
Drift tubes in a Large Resonant Cavity



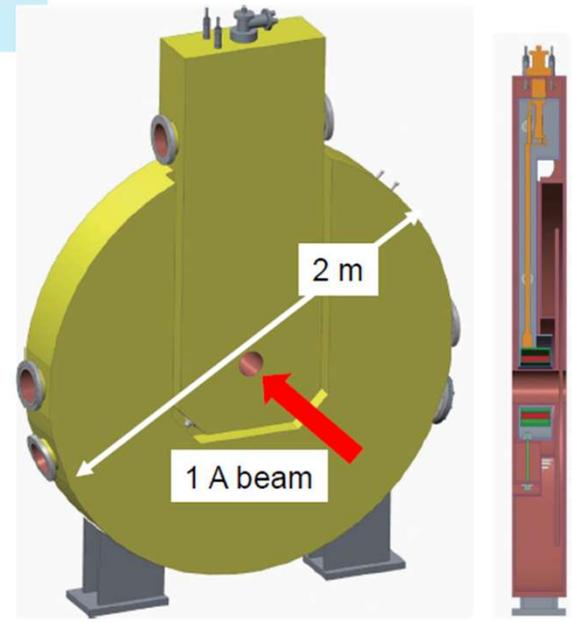
Material Test Accelerator at LLNL (1950-54)
D+, 250 mA, 7 MeV for production of T



Vanes in a large Resonant Cavity with the combined functions of acceleration and focusing in transverse direction
RFQ at QST 六ヶ所研 in 2019
D+, 125 mA, 5 MeV



リエントラント型共振器
25MHz、90 Cells(0.1->5 MeV)



先祖返り?

最も単純構造のこのタイプの加速空洞で大電流加速に挑んだケースはまだないだろう。

先祖返りする理由：横方向の収束力

永久磁石、常伝導磁石

RFQ(高周波四重極)

高温超伝導体による高磁場ソレノイド

大強度加速器でのtune depression (ν / ν_0) (どれだけ収束力が落ちているか)

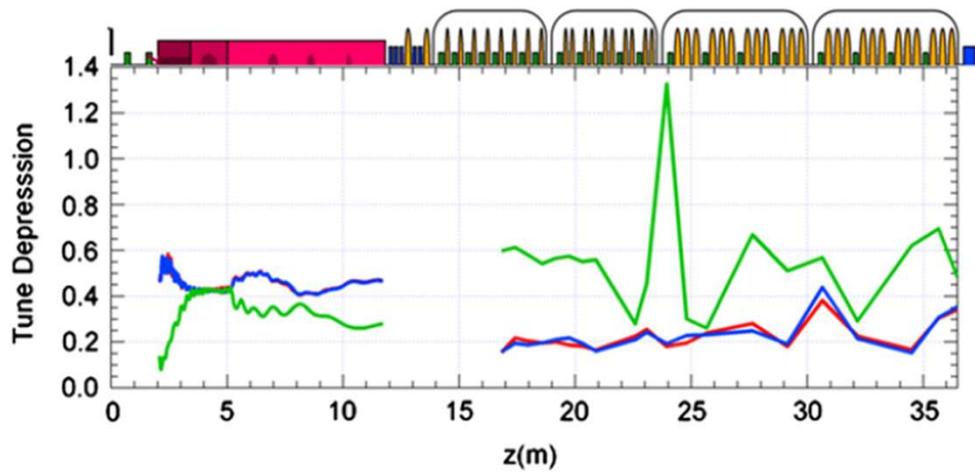


Fig. 4. Tune depression in the RFQ and the SRF-Linac.

IFMIF (~ 0.5)

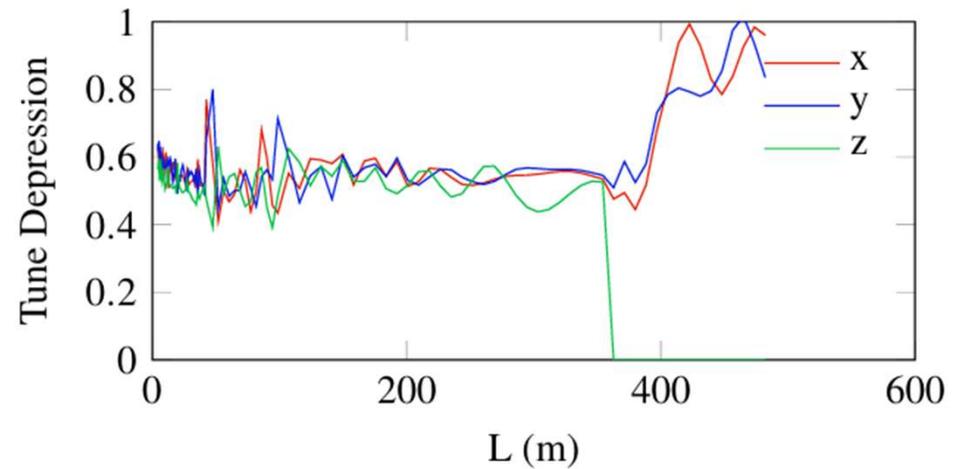


Figure 1: Tune depression in the ESS linac.

ESS (~ 0.6)

1 A線形加速器のTune Depression

$$v = \frac{c}{2\pi f} \sqrt{k_0^2 - \frac{\lambda r_p}{2\bar{a}_0^2}}$$

tune depression η の表式として

$$\eta \equiv \frac{v}{v_0} = \sqrt{1 - \frac{\lambda r_p}{2k_0^2 \bar{a}_0^2}} = \sqrt{1 - \frac{2u}{u^2 + \sqrt{1+u^2}}}$$

1A重陽子線形加速器の場合、 ~ 0.9 ほどとなる見込み