平成30年3月17日
公開シンポジウム

加速器

―核変換を実用化する革新的機器を開発する―

奥野広樹
国立研究開発法人　理化学研究所
仁科加速器研究センター　加速器基盤研究部

1

話の内容

- 加速器とは何か？
  - 加速した車をぶつけるのでは核変換できないのは、どうしてか？
- 革新的加速器とは何か？実現可能か？
  - 「Let it go」な加速器

2

加速器とは

粒子を加速するもの

粒子：我々の世界を作っている極微な基本粒子
- 電子
- 陽子、原子核
- **イオン（原子核＋電子）**

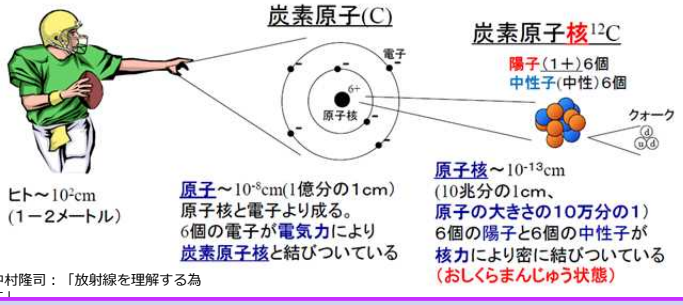
加速：電気の力で加速。LLFPの核変換には、光速の30-60%まで加速する必要あり。
- 静電加速器
- **線型加速器**
- シンクロトロン
- サイクロトロン

原子核を見るための装置
⇒原子核を壊すための装置

原子核を壊す：核変換を起こす

3

原子と原子核（サイズと見る手段）



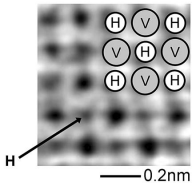
中村隆司：「放射線を理解する為に」

見るものが小さくなればなるほど、高エネルギーの粒子が必要⇒見ること～壊すこと

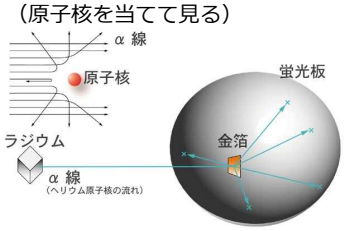
人間の目
（光を当てて見ている）



電子顕微鏡
（電子を当てて見る）

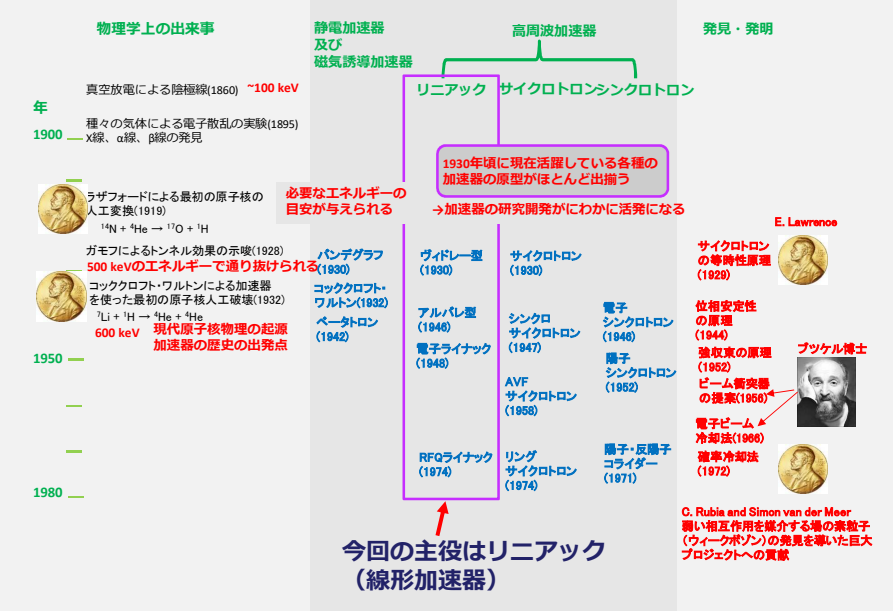


加速器と粒子線検出器
（原子核を当てて見る）



4

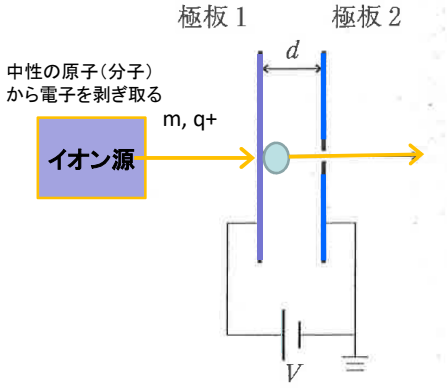
加速器の歴史



5

イオンの加速

単純な加速器（イオン源＋静電加速器）



eV: 1つの電子を1ボルト加速した時に得られるエネルギー
1MeV: 100万電子ボルト

坂道を降りて行く自転車



電圧を高くし過ぎると放電してしまう⇒エネルギーの限界（10MV=0.1億ボルト）
振動電場を用いて繰り返し加速⇒イオンビームを通すタイミングが重要

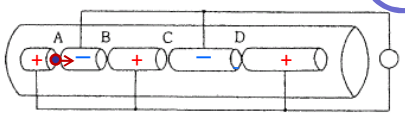
6

交流電場を用いた加速器

線型加速器(リニアック)を用いた加速
(ビームはバンチ化されている)

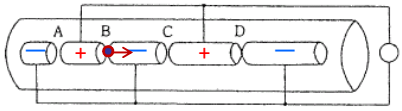
直流ビーム
バンチ化ビーム

時刻ゼロ

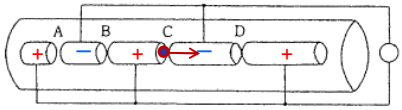


振動電場

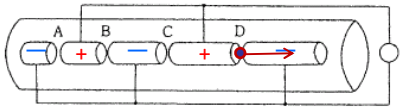
½周期後



1周期後



3/2周期後

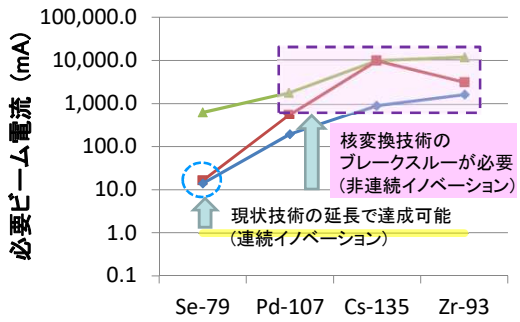


利点
素直で加速しやすい
欠点
一回しか通らないので高い

7

LLFP核変換加速器開発目標

➢ LLFPを実用的な時間注)で核変換するために必要ビーム電流は、同位体分離、偶奇分離、同位体分離なしのいずれでも、現状の加速器性能(1mA)を大幅に上回ることが判明。



年間発生量(kg/y)	5	250	417	767

加速器及び標的技術にブレークスルーをもたらす非連続的イノベーションが必要

注:入射エネルギー1000MeVの陽子により年間発生量を有効半減期3年で核変換した場合

8

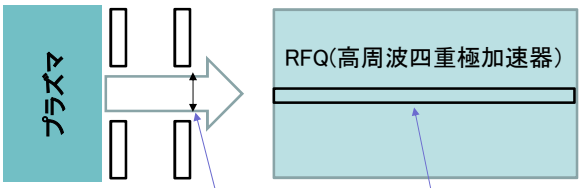
必要な性能

- 粒子　　:重陽子
- エネルギー　　:40–200 MeV/u
- 電流値　　:1A
- ビームパワー　　:80MW–200MW x 2
- 加速器の形式　　:リニアック(線形加速器)

9

問題点：ビーム径

RFQ加速器は大強度高エネルギー陽子(重陽子)リニアックの低エネルギー部で広く使われている。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。





RFQの断面図
○ ビームが通過できるところ

1Aの場合:ビーム径10cm >> RFQのアクセプタンス1cm

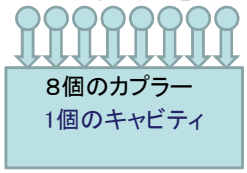
RFQが使えない！！
(アクセプタンスを10cmにしようとすると放電限界に達してしまう)

10

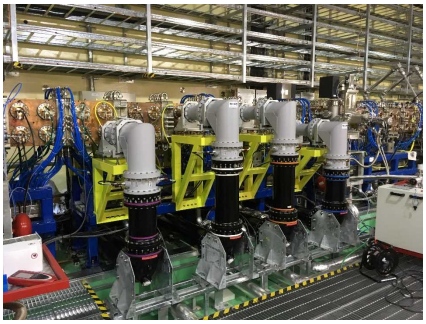
問題点：カプラーの数

ビームパワー：100MW級
→カプラーの数：100本以上（一本1MWとして）

8個の高周波電源



IFMIFのRFQ



IFMIFの8倍必要、
64本以上必要！

IFMIF:国際核融合材料照射施設

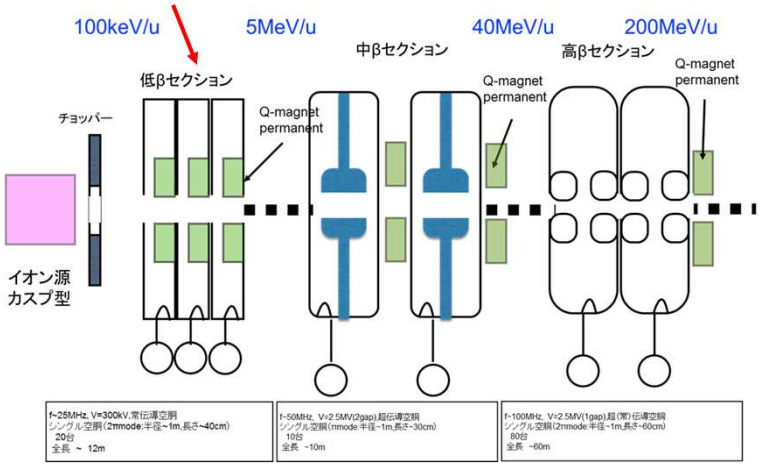
カプラーが多すぎる！！

11

ImPACT2017 のポイント

RFQの代わりに、シングルギャップキャビティ＋Q磁石を置き、大面積のビームを受け、RFQ同様の機能を持たせる

全てシングルセルキャビティにより構成
・1台当たりのRFカプラーの数を減らす
・大強度ビームに対してRFパワー入れやすくする。
・RFの位相を自由に選べる。



国内特許出願(2018/1/22)

12

リニアックの長さ

E_d (MeV/核子)	ビーム電流(A)	低速部 #	中速部 #	高速部 #	合計(加速器部)
40	>1	10MV ~20m	70MV ~60m	-----	~80m
100	>1	10MV ~20m	70MV ~60m	120MV ~80m	~160m
200	>1	10MV ~20m	70MV ~60m	320MV ~160m	~240m
IFMIF		**RFQ**	**超伝導加速空洞**		
20	~0.25	1.25MW 10m	8.75MW 22.4m		~32.4m

 # 4 coupler（1.6 MW/cavity)を想定
M: Mega: 10^6: 100万
IFMIF:国際核融合材料照射施設
RFQ: 高周波四重極加速器

13

本研究で明らかになってきたこと

- 核変換の実用化に必要不可欠な革新的加速器は実現可能である

革新的加速器とは：
1Aの重陽子ビームを40MeV/核子～200MeV/核子まで加速できる加速器

特徴：
1：イオン源から得られる大口径ビームをアクセプタンスの小さいRFQ（電場収束、従来技術）を使わず、アクセプタンスが大きく取れる磁場収束とシングルギャップ空洞を組み合わせて、ビームのバンチ化、収束発散、加速を行う。

1Aのビームの強い空間電荷力を無理に押さえ込まずに加速

2：シングルギャップ空洞を並べることにより、空洞1台当たりのカプラーの数を減らすことが出来る。

14