革新的研究開発推進プログラム ImPACT

平成30年3月17日
公開シンポジウム

核変換

ー放射性物質を高効率で短寿命・無害化するー

櫻井博儀
理化学研究所　仁科加速器研究センター

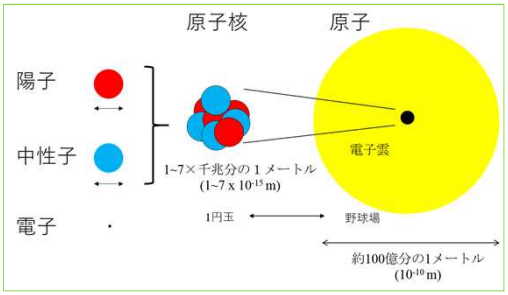
1

革新的研究開発推進プログラム ImPACT

核変換とは

「原子核を他の核種に
変えること」

「原子核の
陽子数、中性子数を
変えること」



高レベル放射性廃棄物中の長寿命核種を
安定核種もしくは短寿命核種
に変換すること、およびそのための技術

ちなみに「錬金術」：元素を他の元素に変える技術
（陽子数を変える技術）

2

パラジウム（Pd)-107の分離核変換プロセス

高レベル廃棄物



分離回収

パラジウムの化学分離

化学分離技術開発

偶奇分離

分離されたパラジウムから
Pd-107（中性子数　61）
（半減期　650万年）を抜きだす

存在比(%)	16	28	27	16	11	0	3
中性子数	58	59	60	61	62	63	64
	104	105	106	107	108		110
	安定	安定	安定		安定	半減期 13時間	安定

レーザー偶奇分離装置開発（理研）

偶　104　106　108　110

奇　105　107

Pdインゴット

再利用プロセス概念

インゴット化

クリアランスレベル検討

核変換

反応データ取得（理研）
実証試験着手（理研）
加速器開発（理研）

ビーム照射によってPd-107を安定核種や短寿命核種に変換（陽子数、中性子数を反応で変える）

104　106　中性子を1個放出させると安定核種　(n,2n)反応

105　107　核変換で異なる安定元素、短寿命核種に変換

106　108　中性子を1個吸収させると安定核種

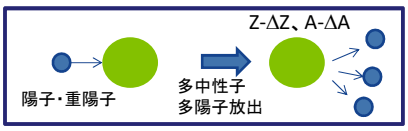
中低レベル廃棄物

3

核変換のための核反応とデータ取得

加速器で得られる1次ビーム利用

陽子・重陽子ビーム照射　核破砕反応　最も効率的



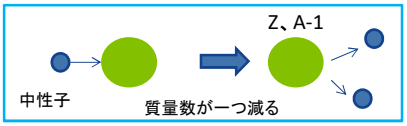
2次ビーム利用

熱中性子　中性子捕獲反応（多くのデータあり）

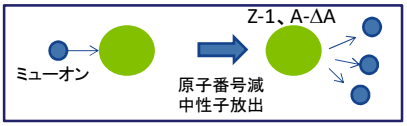
高速中性子　中性子捕獲反応



14MeV中性子　(n,2n)中性子ノックアウト反応



負ミューオン　ミューオン捕獲反応



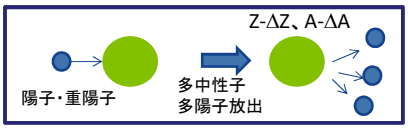
4

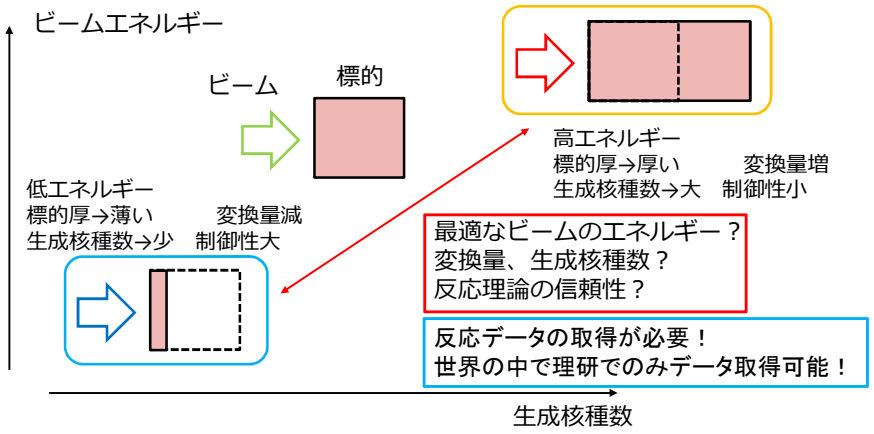
核破砕反応

加速器で得られる1次ビーム利用

陽子・重陽子ビーム照射

核破砕反応
最も効率的

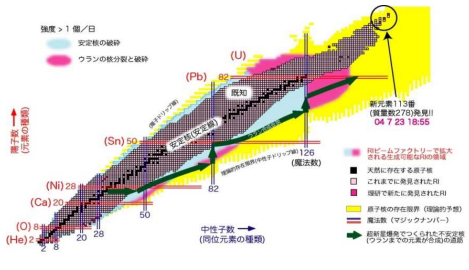




5

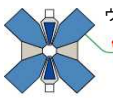
ＲＩビームファクトリーとは

- RIBFの目標:「究極の原子核像の構築」、「元素の起源の解明」、「新しい応用研究」
- 放射性同位元素（RI）をビーム（Beam）として取り出し工場（Factory）のように大量生産する
- 世界最高強度のRIビームを供給し、RIを大量生産
- 2007年より本格始動。世界トップ性能





世界初、史上最強
K2600MeV (8,300tons)
超伝導リングサイクロトロン
(SRC)
水素からウランまでの元素を
核子当たり350MeV/uまで加速
ウランを目標エネルギーまで
加速に成功　2006年12月



核破砕・核分裂反応を
利用したRI生成

超伝導RIビーム
生成分離装置

物理的手法
高速分離　400ns

RIをビームとして供給
200 -300 MeV/u

下流の基幹実験装置群を利用し、
RIビームの2次反応・
停止によりデータ測定

逆運動学的手法と解析法の蓄積

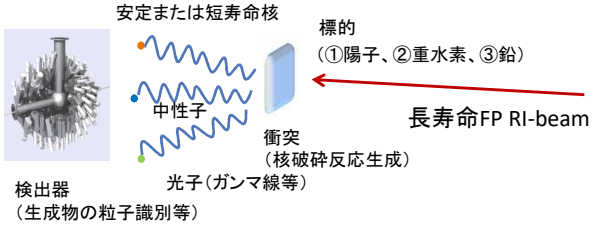


世界最大口径
9 Tm (77 m)
超伝導RIビーム生成分離装置
(BigRIPS)
核分裂片の約50%を収集
世界最高のRIビーム分解能
を達成　2007年5月

6

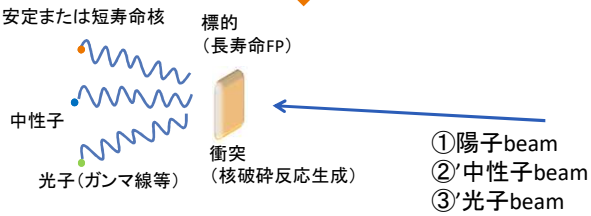
核変換データ取得の仕組み（逆運動学の活用）

RIBFにおける核データ取得の仕組み



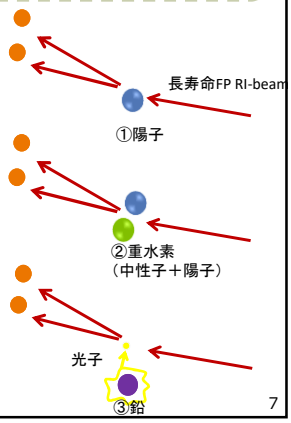
どのビームを、どう当てると最も合理的か（核変換データ）

実際の核変換の仕組み



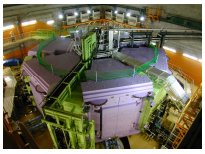
なぜ逆運動学を活用するのか

- ビーム核と標的核を入れ替えても起こる反応は同じであることを利用する。
- 最適な厚みの標的をFPで作ることや、生成物が標的に留まるなど測定が困難であるが、例えば理研の装置を利用すると反応生成物全ての種類と性質を同時に正確に求めることができる。
- 同時にできるもの全ての性質（種類やエネルギー等）が分かれば、これを利用して核変換のためのシミュレーションが可能になる。



7

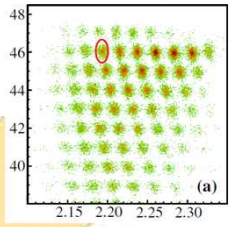
ウランビームから^{107}Pd を2次ビームとして生成



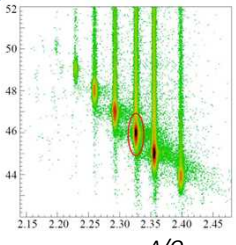
超伝導リングサイクロトロン（SRC）
大強度ウラン−238イオンの加速

②二次標的
陽子、重陽子標的

③ゼロ度スペクトロメータで
反応生成物の観測と識別







逆運動学法：2016 Press Release : Cs/Sr の測定にて、その有用性は確認済
*）2016年プレスリリース「放射性廃棄物の処理問題解決への第一歩」

8

まとめと今後

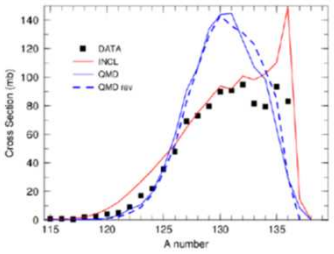
○加速器を利用した核変換は、様々な反応を取捨選択でき、
LLFP核種や用途に合わせて最適な反応を適応することができる。

○核反応データはシステム設計のための基盤

これまでに取得した世界初の
核破砕反応データ →

核種	低エネルギー	中エネルギー	高エネルギー
^{107}Pd	○	○	○
^{93}Zr	○	○	○
^{79}Se			○
^{126}Sn			○
^{135}Cs			

低エネルギーデータから
(n, 2n)、(n, 3n)等の
反応確率の推定（予定）
この他、
ミューオン捕獲データなど
も取得
反応理論モデルの改良



○シミュレーションコードの
高度化によるシステム設計へ

9