
新規医療イノベーションのためのシンポジウム（2015/10/21）

サイクロトロンとRI製造技術の 開発状況

～大阪大学殿との連携に関連して～

住友重機械工業株式会社
日朝俊一

加速器

住友の加速器(研究用途)



Ring Cyclotron (RCNP, Osaka)



Large Injector for Heavy Ion Therapy
(NIRS, Japan)



110MeV Cyclotron

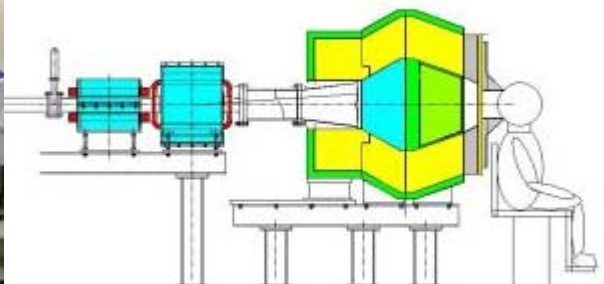


Compact Synchrotron for AURORA
(700MeV)

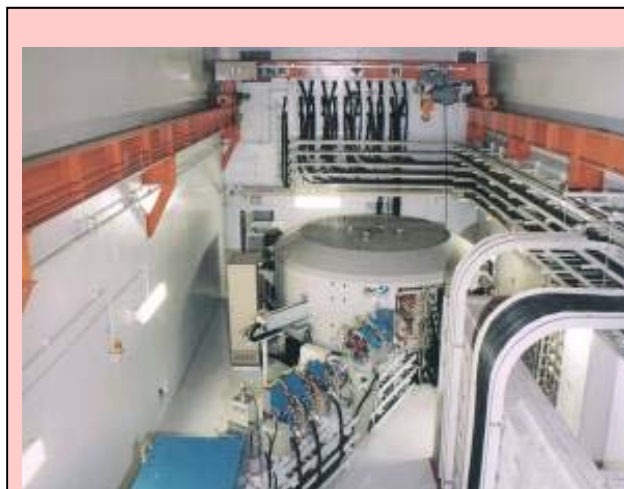
住友の医療用サイクロトロン



30 MeV Cyclotron

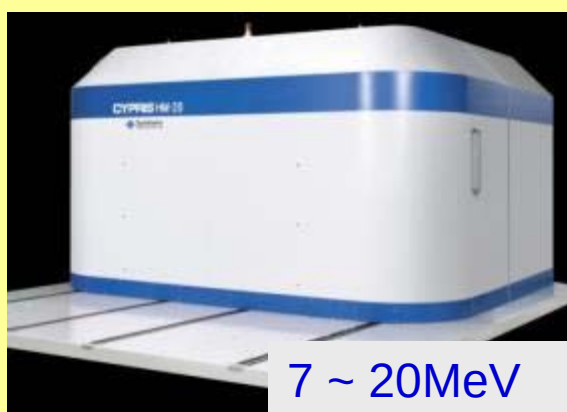


Cyclotron-based BNCT
(Boron Neutron Capture Therapy)



30 ~ 70MeV

SPECT Cyclotron



7 ~ 20MeV

PET Cyclotron

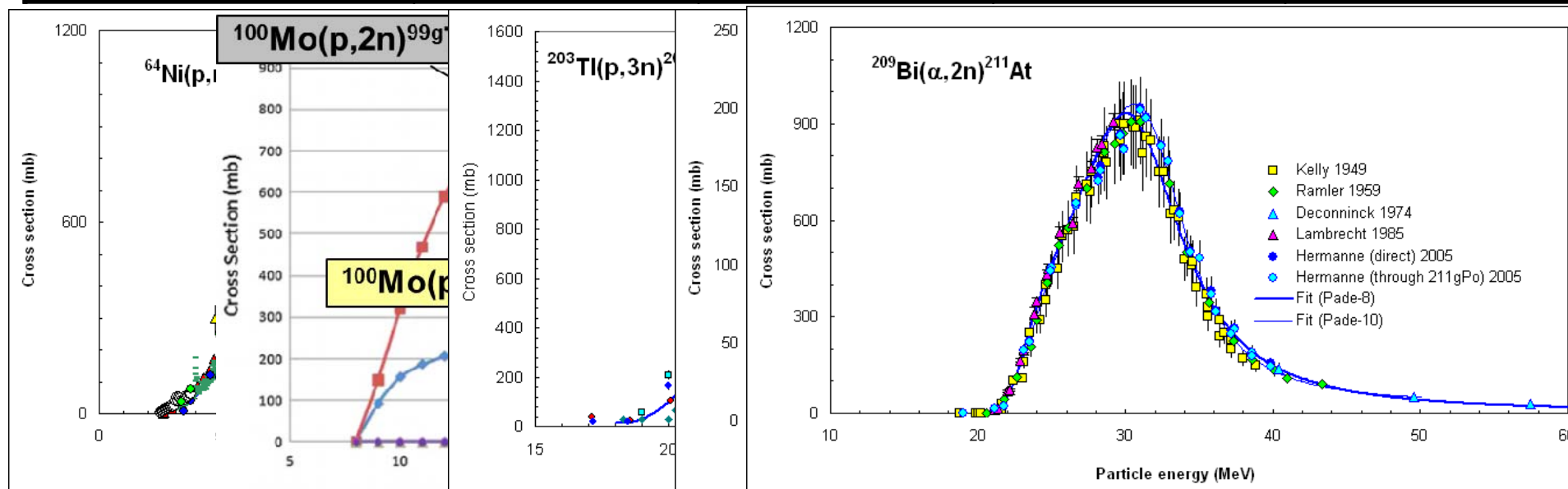


Proton Therapy System
(230MeV)

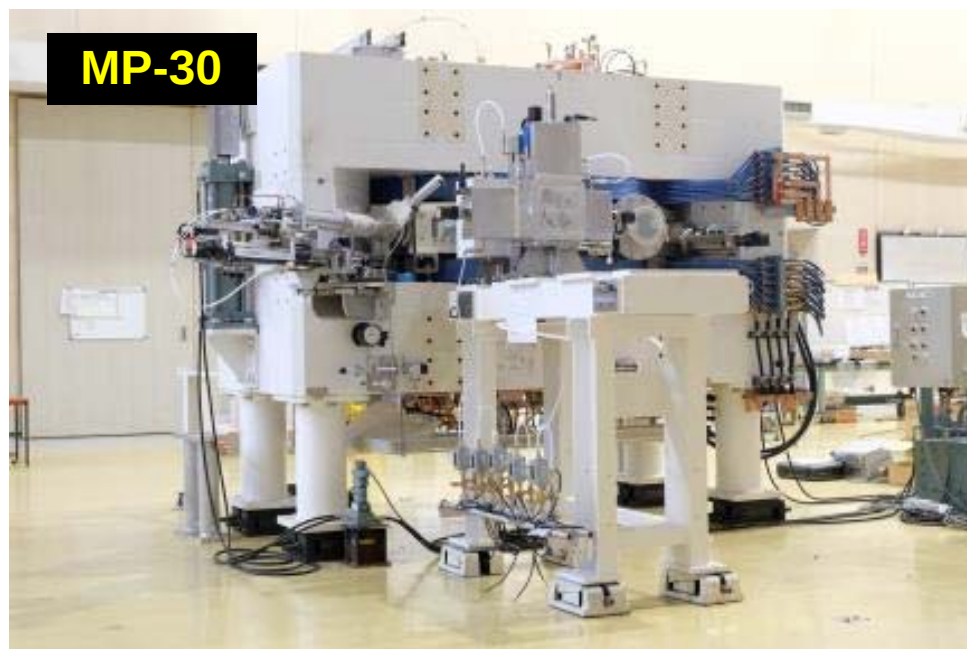
RI製造用サイクロトロン

RI製造用サイクロترون

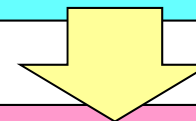
		HM-12	HM-20	HM-30	MP-30
Proton	Energy	12 MeV	20 MeV	30 MeV	15 - 30 MeV
	Current	150 μ A	150 μ A	1,000 μ A	100 μ A
Deuteron	Energy	6 MeV	10 MeV	N/A	8 -15 MeV
	Current	40 μ A	50 μ A	N/A	50 μ A
Alpha	Energy	N/A	N/A	N/A	32 MeV
	Current	N/A	N/A	N/A	30 μ A
Radio Isotopes		$^{18}\text{F}/^{15}\text{O}/^{13}\text{N}/^{11}\text{C}$ $^{64}\text{Cu}/^{89}\text{Zr}$ Other (p,n) reaction	+ $^{67}\text{Ga}/^{76}\text{Br}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ $^{111}\text{In}/^{124}\text{I}$ Other (p,2n) reaction	+ $^{62}\text{Zn}/^{68}\text{Ge}/^{111}\text{In}$ $^{123}\text{I}/^{201}\text{Pb}$ Other (p,3n) reaction	+ $^{177}\text{Lu}/^{211}\text{At}$ Other (d,x), (α ,x) reaction



多目的サイクロترون MP-30



Proton	15 - 30 MeV
Deuteron	8 - 15 MeV
Alpha	32 MeV



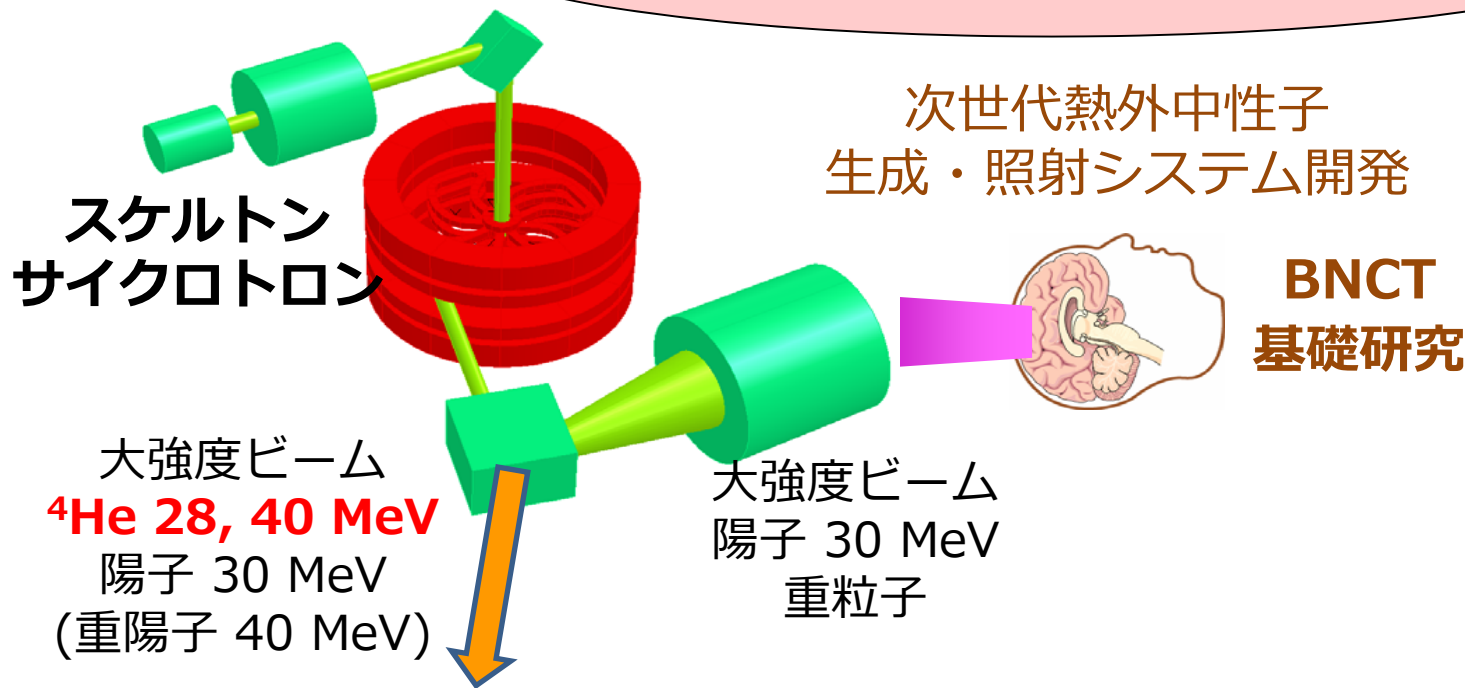
For Nuclear Reaction of
(p,x) (d,x) (α ,x)

First machine had been delivered
to **Fukushima Medical University**
on 27th of September, 2015.

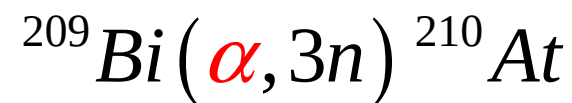
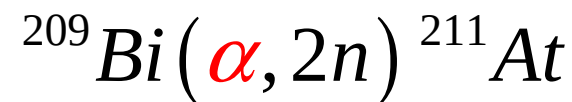


高強度小型高温超伝導スケルトン・サイクロトロン

大阪大学殿との共同開発

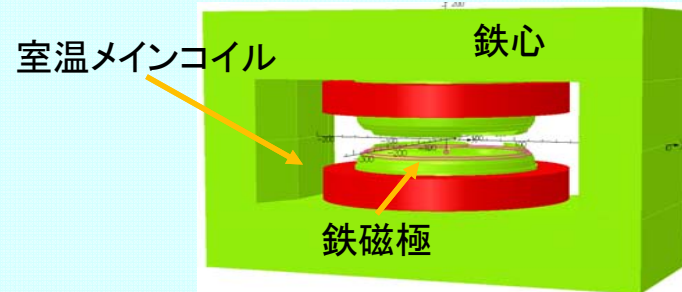


**核医学診断・放射線治療用
R I の大量生産
特に・・・At-211**



サイクロトロン課題と解決に向けた開発

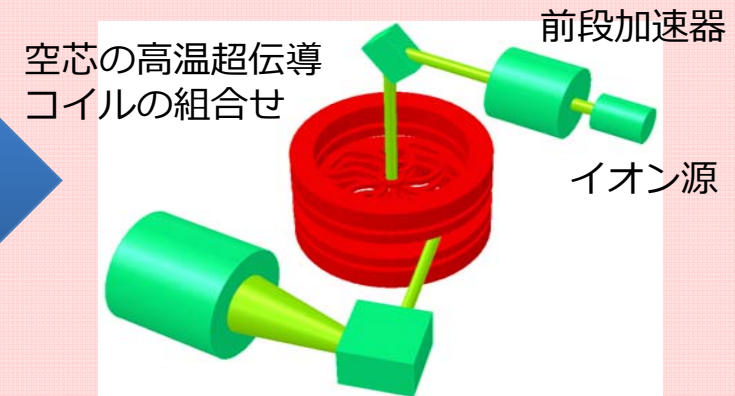
従来のAVFサイクロトロン



【課題】

- ① 室温コイルと鉄心の組合せでは磁束密度に限りあり
→ 高エネルギー化、コンパクト化が困難
- ② コイルの発熱により鉄心温度が変化
→ 磁場が安定しないため、ビーム強度と質が変動
- ③ ヒステリシスにより磁場が再現しない
→ エネルギー変更が困難
- ④ 常伝導コイルは消費電力が大
→ 運転コストが大きい
- ⑤ 鉄磁極が空間的な自由度を奪っている
→ 機器の配置に制約あり

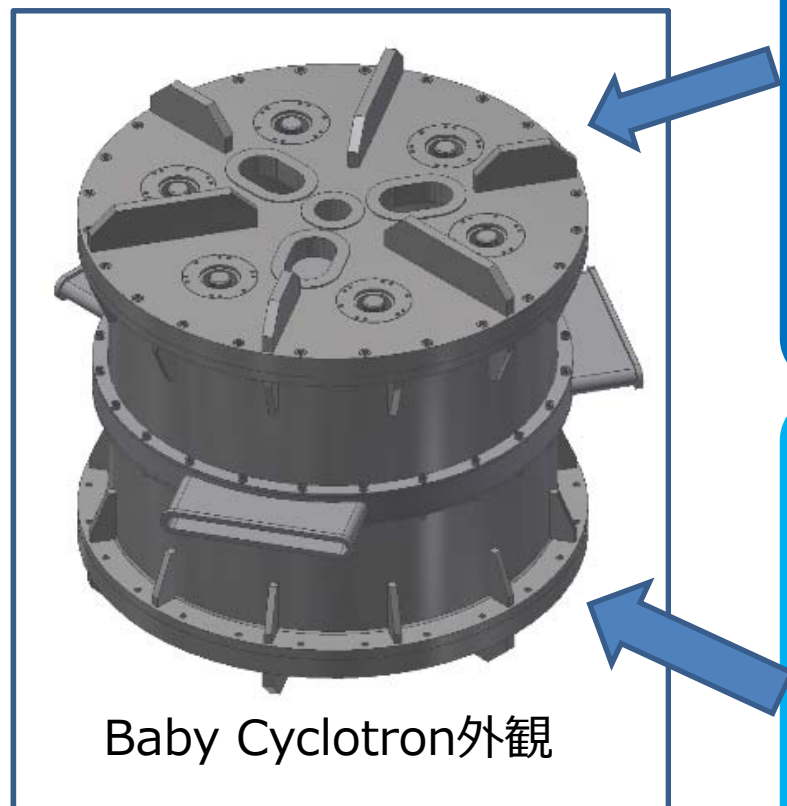
“スケルトン・サイクロトロン”



【解決策】

- ★ 高温超伝導コイルを採用
→ 臨界温度が高く、マージンが大
→ 省電力で、高磁場を発生
→ 磁場強度は室温に依らず安定
- ★ 空芯型サイクロトロン（世界初）
→ 磁場強度の再現性に優れ、運転が簡単
→ コンパクトで省スペース、内部機器の配置が自由、ビームの高強度化が可能

大阪大学殿との共同開発・設計

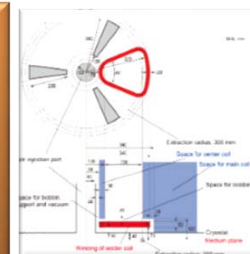


物理設計

- 軌道計算
- RF空洞設計

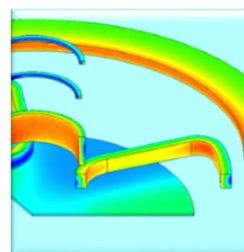
磁場設計

- 高温超電導特性を考慮した各コイルの配置&寸法最適化



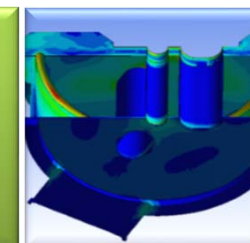
磁場計算

- 各コイルの電磁力解析
- 渦電流損失解析



機械設計

- 機器配置・構造設計
- 冷却設計



*RI*製造

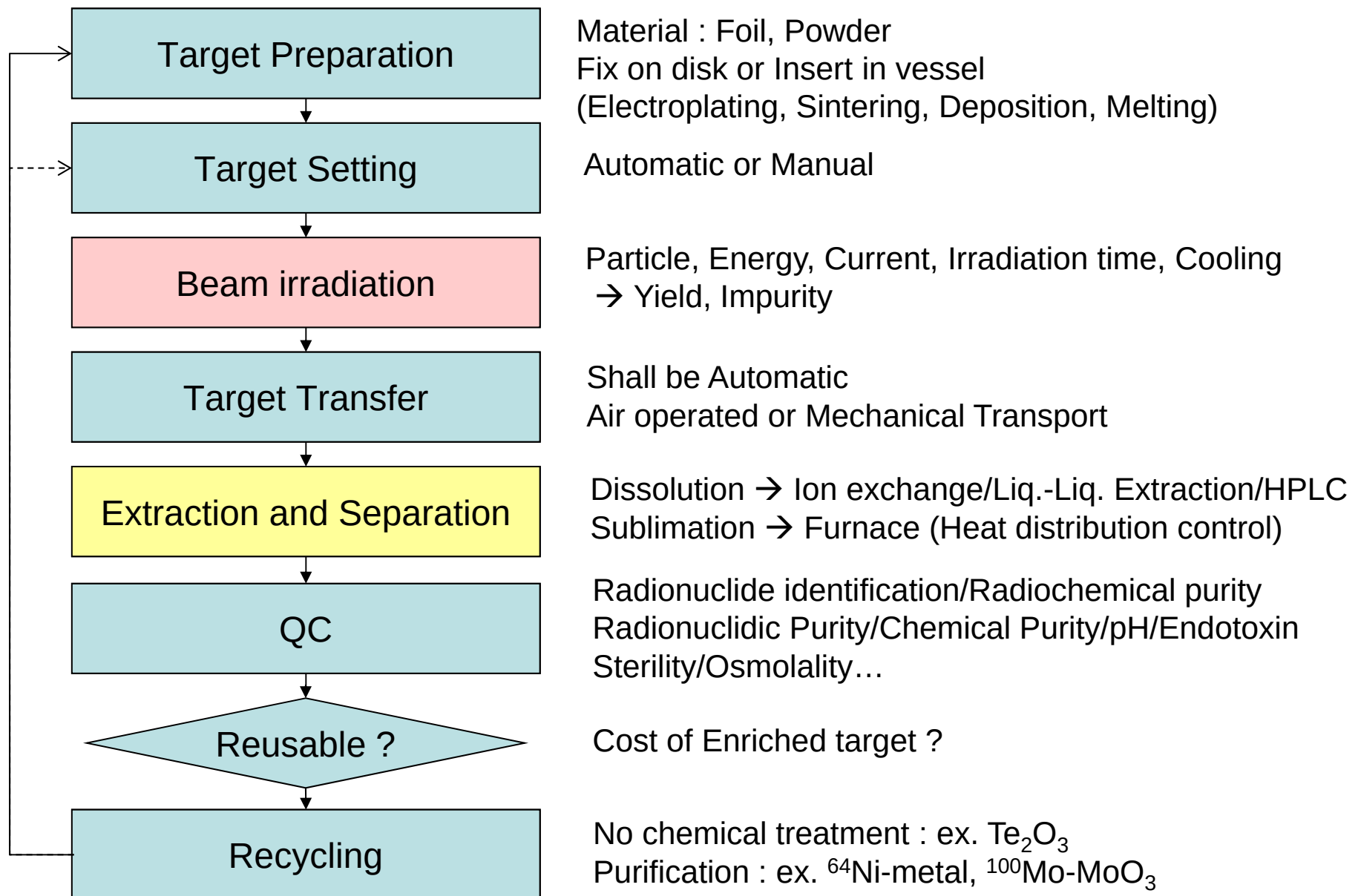
RIとその利用

		Medical	Radio Isotopes
Diagnosis	Tumor	SPECT : ⁶⁷ Ga/ ^{99m} Tc/ ²⁰¹ Tl PET : ¹⁸ F(FDG etc.)/ ¹¹ C(MET etc.)/ ⁶⁴ Cu/ ⁶⁸ Ga	
	Cardiac	SPECT : ⁸² Rb/ ^{99m} Tc/ ¹¹¹ In/ ¹²³ I/ ²⁰¹ Tl PET : ¹³ N(NH3)/ ¹¹ C (ACE etc.)/ ¹⁵ O	
	Brain	SPECT : ^{99m} Tc/ ¹¹¹ In/ ¹²³ I PET : ¹⁸ F (Fluorbetapir etc.)/ ¹¹ C/ ¹⁵ O/ ⁶² Cu/ ⁶⁸ Ga	
	Others (in vivo)	SPECT : ⁵¹ Cr/ ^{81m} Kr/ ¹²³ I/ ¹³¹ I/ ¹³³ Xe PET : ⁶⁴ Cu/ ⁷⁶ Br/ ⁸⁶ Y/ ⁸⁹ Zr/ ¹²⁴ I	
	in vitro	³ H/ ⁵⁹ Fe/ ¹²⁵ I	
Therapy	Brachytherapy	⁶⁰ Co/ ⁹⁰ Sr/ ¹⁰³ Pd/ ¹²⁵ I/ ¹³¹ I/ ¹³⁷ Cs/ ¹⁴⁹ Tb/ ¹⁹² Ir/ ¹⁹⁸ Au/ ²²³ Ra	
	Immunotherapy	α-emitter : ²¹¹ At/ ²¹³ Bi β-emitter : ³² P/ ⁴⁷ Se/ ⁶⁷ Cu/ ⁸⁹ Sr/ ⁹⁰ Y/ ¹³¹ I/ ¹⁵³ Sm/ ¹⁶⁶ Ho/ ¹⁶⁹ Er/ ¹⁷⁷ Lu/ ¹⁸⁶ Re Auger : ¹⁶⁵ Er	

Blue: established
Red: in progress

		Industrial	Radio Isotopes
Radiography		²⁴¹ Am/ ²⁵² Cf(Neutron), ⁷⁵ Se/ ¹⁶⁹ Yb/ ¹⁹² Ir(Gamma)	
Gauging		⁶³ Ni/ ⁸⁵ Kr/ ⁹⁰ Sr/ ²⁰⁴ Tl	
Tracer		³ H/ ¹⁴ C/ ⁵¹ Cr/ ⁵⁴ Mn/ ⁶⁵ Zn/ ^{99m} Tc/ ¹⁹⁸ Au	
Sterilization		⁶⁰ Co/ ¹³⁷ Cs	

金属ターゲットの製造プロセス概要



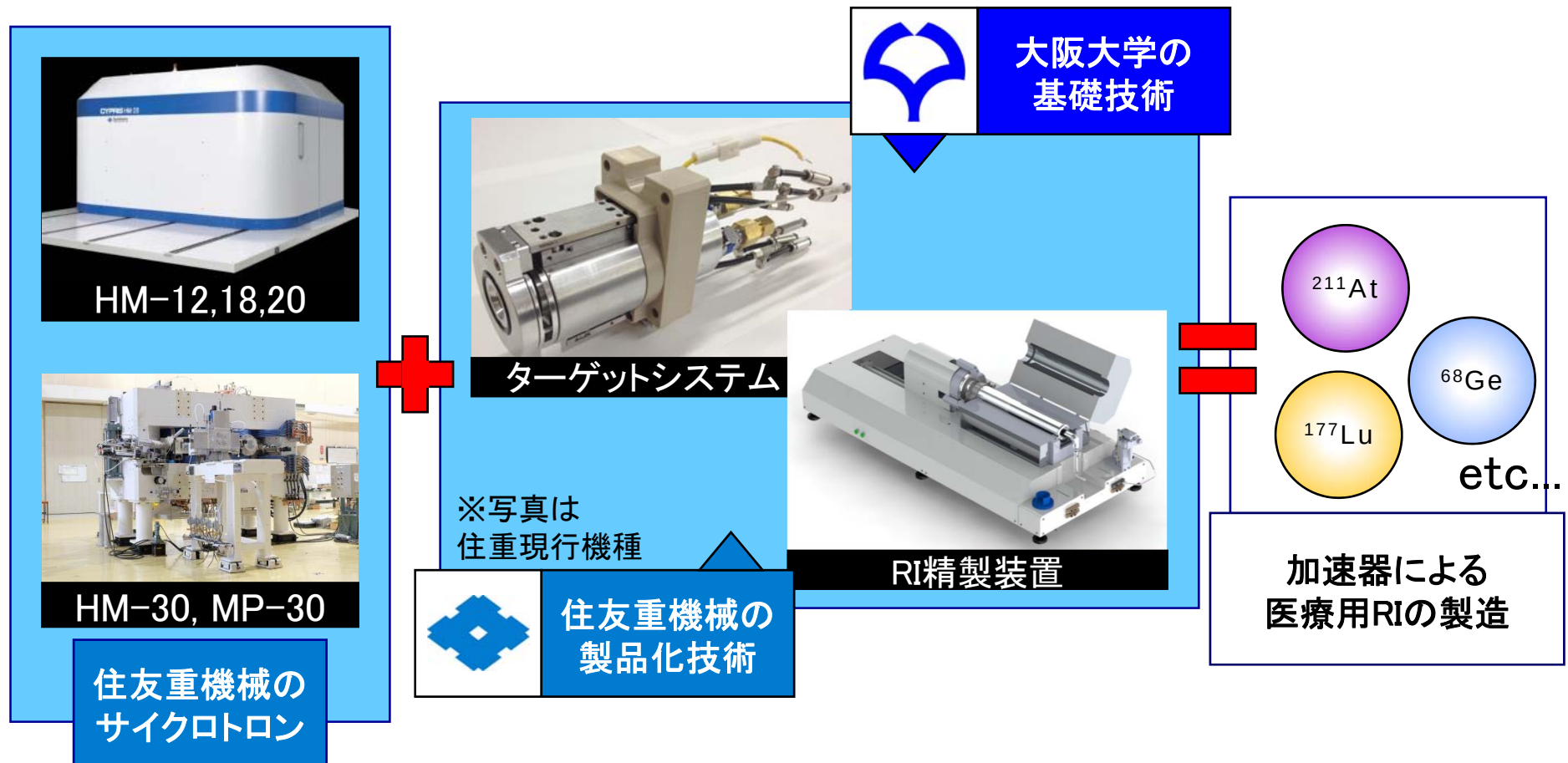
金属ターゲットの主な精製方法

	乾式法	湿式法		
	乾式蒸留	樹脂法		溶媒抽出法
		陰イオン交換樹脂	キレート樹脂	
分離原理	沸点/昇華点の違い	陰イオンになりやすさの違い	目的RIの特異的結合	親油性化合物になりやすさの違い
利点	化学処理不要	(標準手法)	高い精製分離能力	単純な化学操作
欠点	気化RI漏えいのリスク	腐食性化学薬品の使用		自動化困難
精製前ターゲット材の化学処理	不要	強酸等での溶解作業必要		
精製後ターゲット材の再生化学処理	不要	必要		
代表的な利用できるRI※	^{76}Br , ^{124}I , ^{211}At , $^{99\text{m}}\text{Tc}(\text{TcO}_4^-)$	ほとんどの金属元素 (^{62}Zn , $^{99\text{m}}\text{TcO}_4^-$)	^{64}Cu , ^{89}Zr , $^{99\text{m}}\text{Tc}(\text{TcO}_4^-)$, ^{177}Lu	^{68}Ge , $^{99\text{m}}\text{Tc}(\text{TcO}_4^-)$, ^{111}In , ^{201}Pb , ^{211}At

※赤字がこれまでに共同研究を行った核種

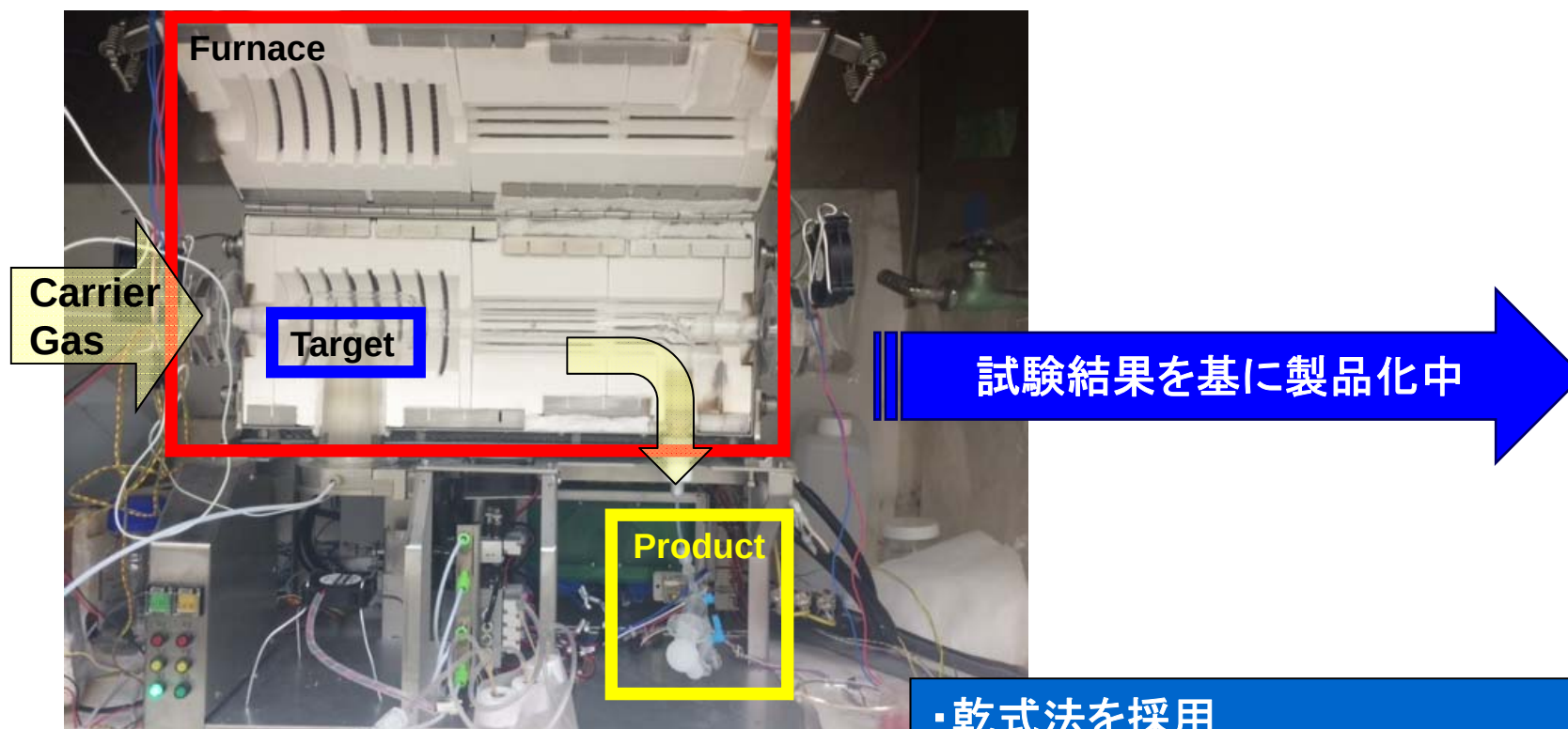
大阪大学と住友重機械との共同研究

2014年度より、小型～中型加速器で製造可能な
医療用放射性核種製造(ターゲット)と
精製(RI精製装置)技術の共同研究開始



2014年度の共同研究-1

試作ハロゲン核種精製装置(P-HDS100)の試験(^{211}At 精製試験)



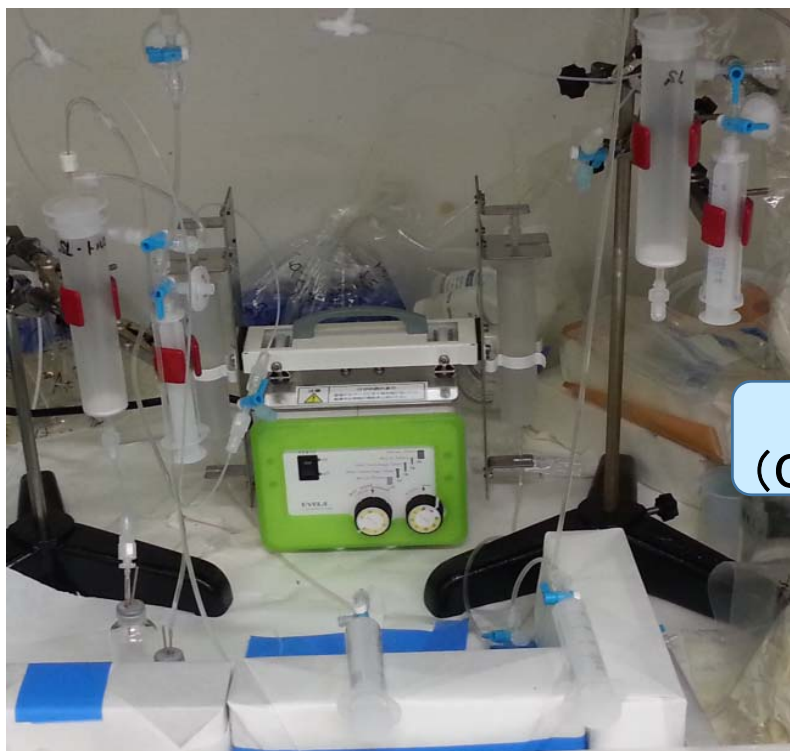
大阪大学核物理研究センター
RI棟で試験中の様子

- ・乾式法を採用
- ・PCによる遠隔操作可能
- ・従来のPET施設のホットセルに設置可能なコンパクト設計

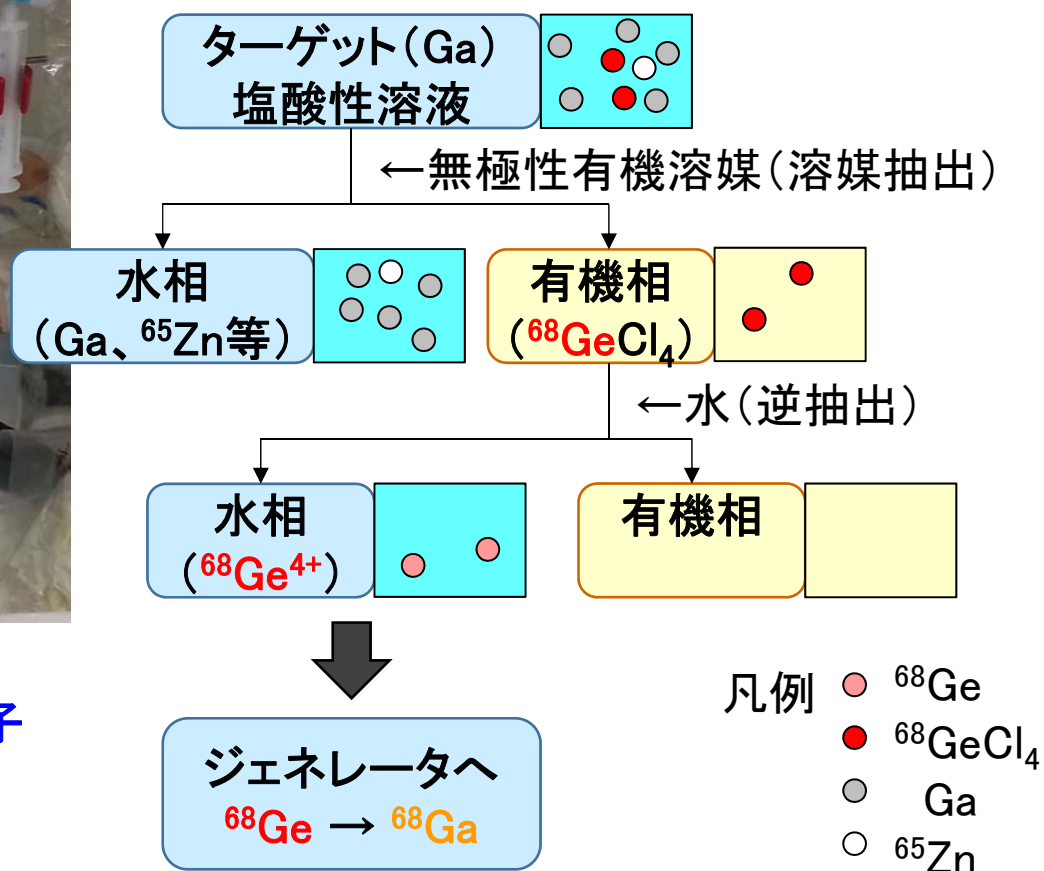
2014年度の共同研究-2

$^{68}\text{Ge}/\text{Ga}$ 溶媒抽出精製法の検討

→金属RI溶媒抽出精製法装置化のための事前検討

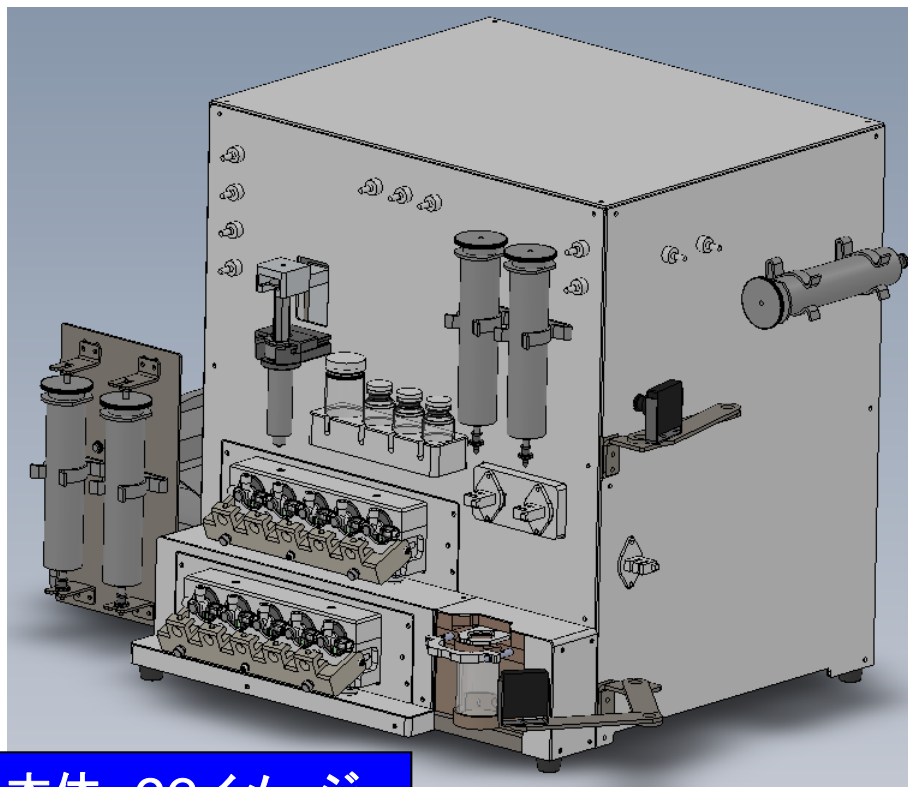


大阪大学核物理研究センター
RI棟での手技試験(準備)中の様子

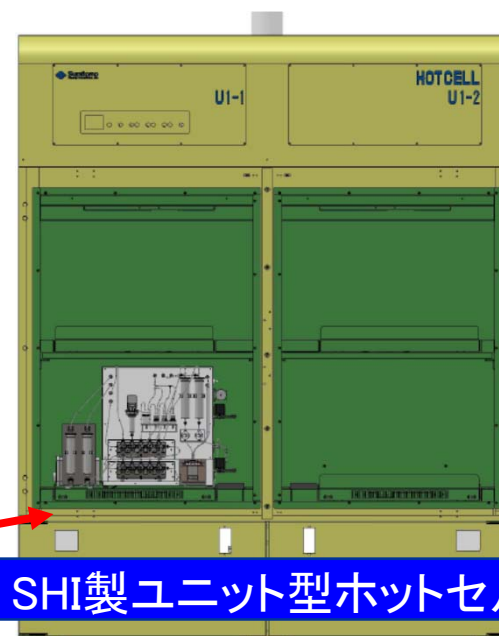


2014年度の共同研究-2

共同研究での知見を基に
→ ^{68}Ge 精製装置 (G-STP100) を開発



本体 CGイメージ



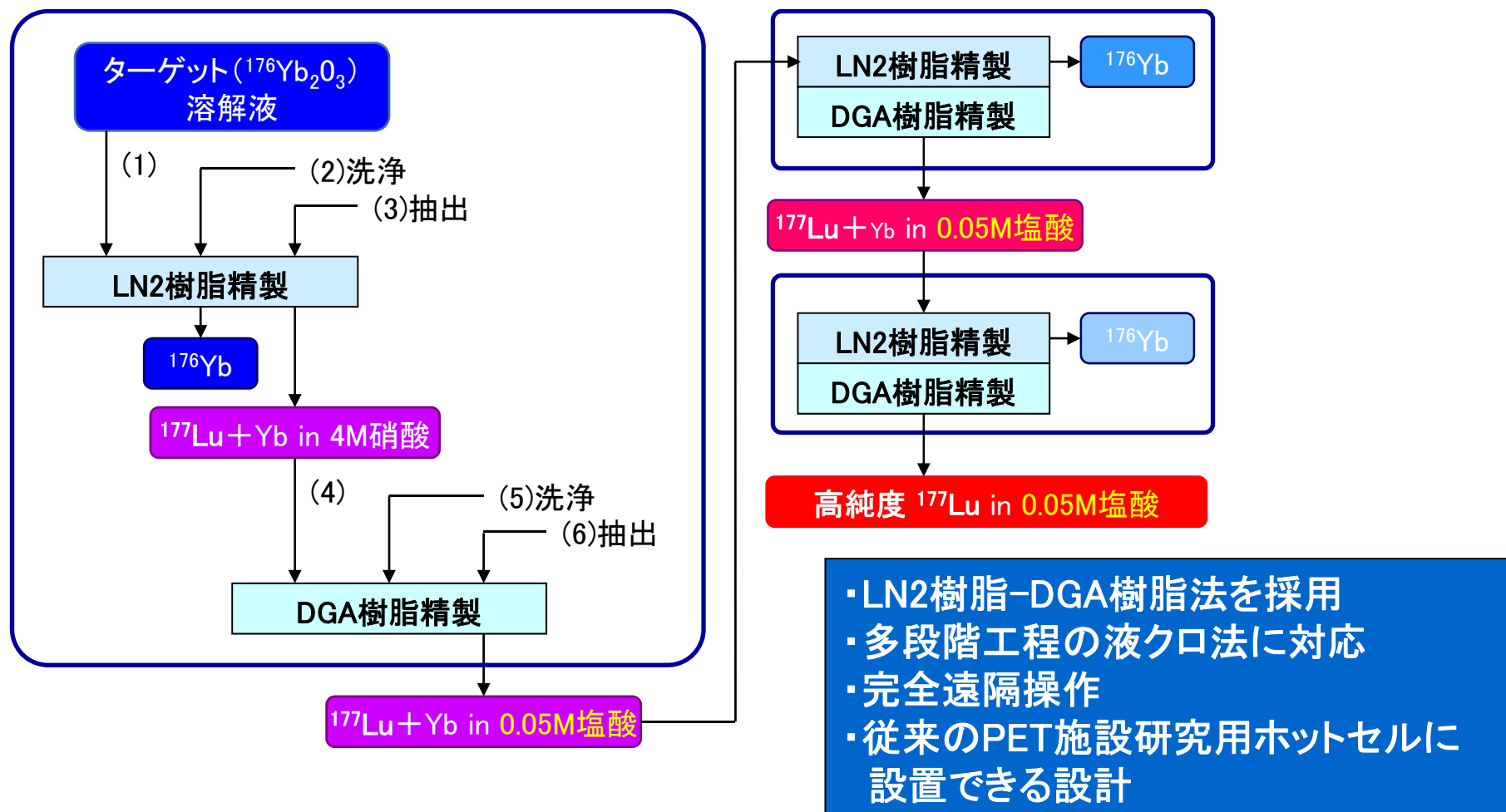
SHI製ユニット型ホットセル

- ・溶媒抽出法を採用
- ・完全遠隔操作
- ・洗浄不要のディスポーザブル配管
- ・従来のPET施設小型ホットセルに設置できるコンパクト設計

★改良型での他核種への対応拡大予定

2014年度の共同研究-3

$^{177}\text{Lu}/\text{Yb}$ 中低圧液クロ精製法の手技検討
→ ^{177}Lu 精製システム(Lu-STP100)開発



まとめ

まとめ

【サイクロトロン】

30 MeVクラスの多目的サイクロトロン

– Proton 15–30MeV, Deuteron 8–15MeV, Alpha 32MeV

→ (p,xn), (d,x), (α ,x) 反応を用いた、様々な医療用RIの製造

大強度ビームのサイクロトロン開発

– スケルトンサイクロトロン(空芯型超伝導)、大阪大学殿との共同研究

→ 有望な医療用RIの大量生産(^{211}At など)

【RI製造】

金属ターゲットシステム

– 外部ビームライン(垂直照射)、ターゲット自動交換／自動搬送

自動分離装置

– 乾式法、イオン交換、溶媒抽出、液クロ

→ RIの製造効率・取り扱いやすさ(簡便さ)・安全性