＊ 大歓迎　大阪ニュークリアサイエンス協会　様
ようこそ　大阪大学　核物理研究センター
サイクロトロン施設へ

*核物理研究センターの概要と加速器応用の最前線

大阪大学　核物理研究センター
加速器研究部門
福田　光宏

*核物理研究センター
(Research Center for Nuclear Physics)
の概要

＊大阪大学の歴史

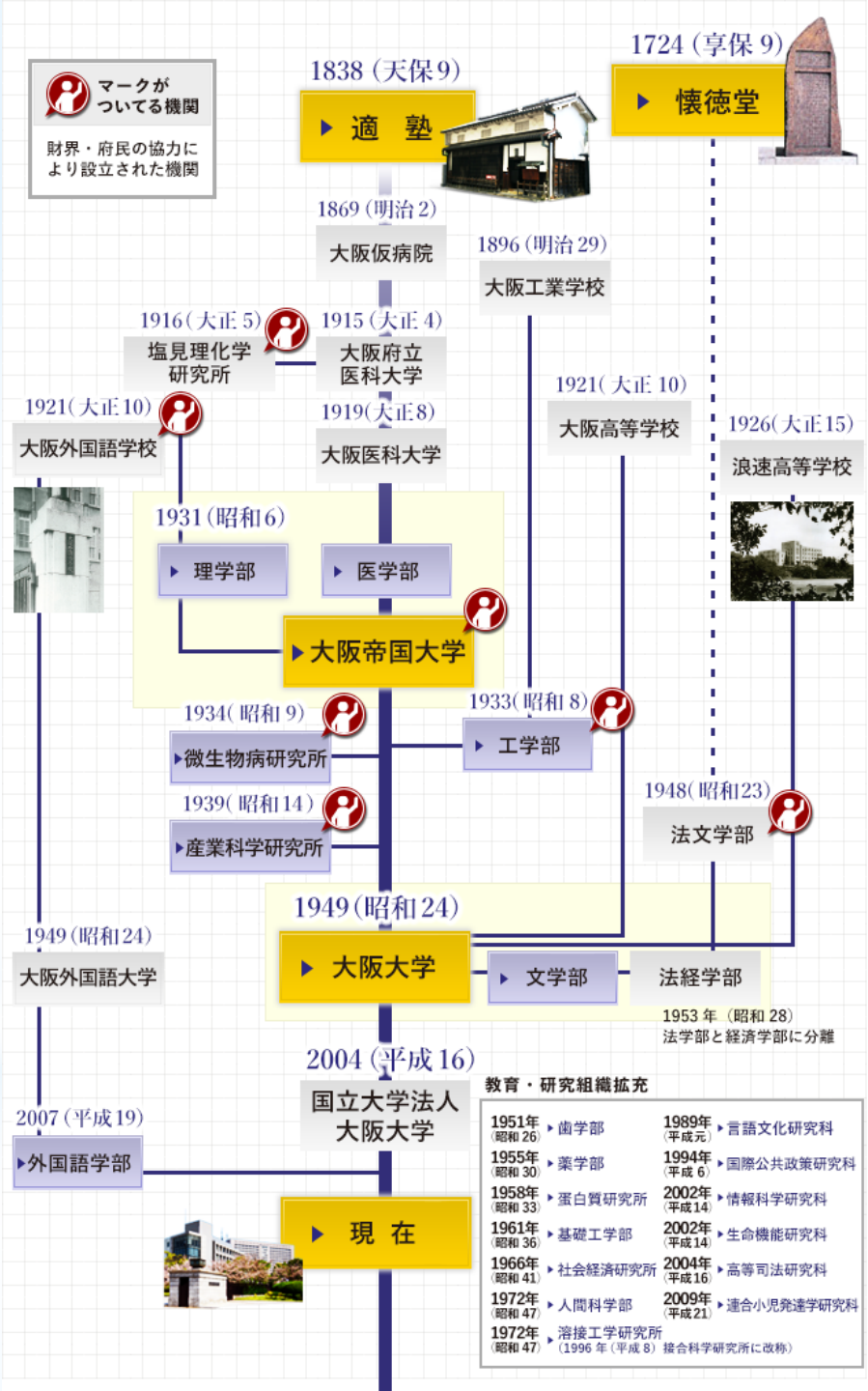
・1838年　緒方洪庵が『適塾』を設立

※司馬遼太郎の長編歴史小説『花神』の中で・・・
『適塾』という、むかし大坂の北船場にあった蘭医学の私塾が、因縁からいえば国立大阪大学の前身・・・

・1931年　我が国6番目の帝国大学として、医学部と理学部の2学部からなる『大阪帝国大学』を創設

※緒方洪庵の「人のため、世のため、道のため」という精神と大阪府民の学問への思いが受け継がれている。

※2021年に創立90周年を迎える



*大阪大学の教育研究組織

H29.8.26

学部

- 文学部
- 人間科学部
- 外国語学部
- 法学部
- 経済学部
- 理学部
- 医学部
  - 病院
  - 動物実験施設
- 歯学部
  - 病院
  - 歯科技工士学校
  - 歯学教育開発センター
- 薬学部
- 工学部
- 基礎工学部

大学院

- 文学研究科
- 人間科学研究科
  - 未来共創センター
  - 比較行動実験施設
- 法学研究科
  - 法政実務連携センター
- 経済学研究科
- 理学研究科
  - 構造熱科学研究センター
  - 基礎理学プロジェクト研究センター
  - 先端強磁場科学研究センター
- 医学系研究科
  - 共同研究実習センター
  - ツインリサーチセンター
  - 未来医療イメージングセンター
  - 最先端医療イノベーションセンター
- 歯学研究科
  - 口腔科学フロンティアセンター
- 薬学研究科
  - 薬用植物園
  - 実践薬学教育研究センター
  - 創薬センター
  - 薬学地 域医療教育研究センター
  - 化合物ライブラリー・スクリーニングセンター
- 工学研究科
  - 超精密科学研究センター
  - アトミックデザイン研究センター
  - サステイナビリティ・デザイン・オンサイト研究センター
  - 構造・機能先進材料デザイン教育研究センター
  - オープンイノベーション教育研究センター
  - フォトニクスセンター
- 基礎工学研究科
  - 極限科学センター
  - 未来研究推進センター
  - スピントロニクス学術連携研究教育センター
  - 産学連携センター
- 言語文化研究科
- 国際公共政策研究科
- 情報科学研究科
- 生命機能研究科
- 高等司法研究科

全国共同利用施設

- 核物理研究センター
- サイバーメディアセンター

世界最先端研究機構

- 免疫学フロンティア研究センター

融合研究拠点

- 大阪大学・情報通信研究機構脳情報通信融合研究センタ

学内組織

- 高等共創研究院
- 未来戦略機構
- 先導的学際研究機構
- データビリティフロンティア機構
- 全学教育推進機構
- 男女協働推進センター
- CO デザインセンター
- グローバルイニシアティブ・センター
- 適塾記念センター
- 21世紀懐徳堂
- 産学共創本部
- 情報推進本部
- 安全衛生管理部
- 法務室
- アーカイブズ
- 環境安全研究管理センター
- 国際教育交流センター
- 生[illegible]際交流センター
- 太[illegible]ギー化学研究センター
- 総合学術博物館
- キャンパスライフ健康支援センター
- 国際医工情報センター
- 数理・データ科学教育研究センター
- 科学機器リノベーション・工作支援センター
- 日本語日本文化教育センター
- ナノサイエンスデザイン教育研究センター
- 知的財産センター

*核物理研究センターの活動拠点

核物理研究センターでの研究活動の特徴

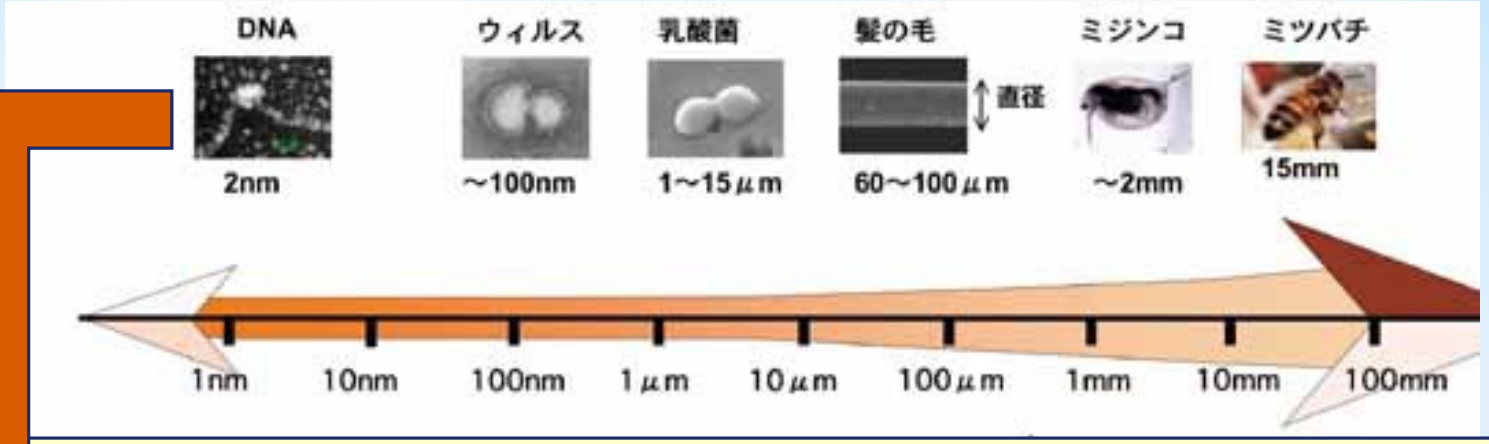
- 加速器を用いた“超精密な”原子核物理研究
- 10万分の1の精度で質量（エネルギー）を測定。
- 物質の階層構造の起源を解明。

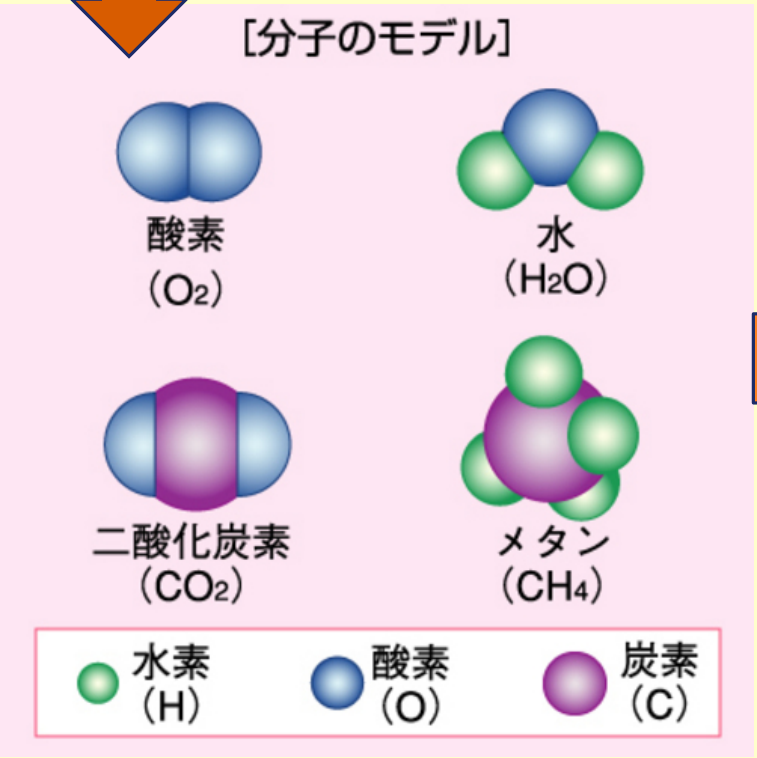
  物質 ＞ 分子 ＞ 原子 ＞ 原子核 ＞ 核子 ＞ クォーク

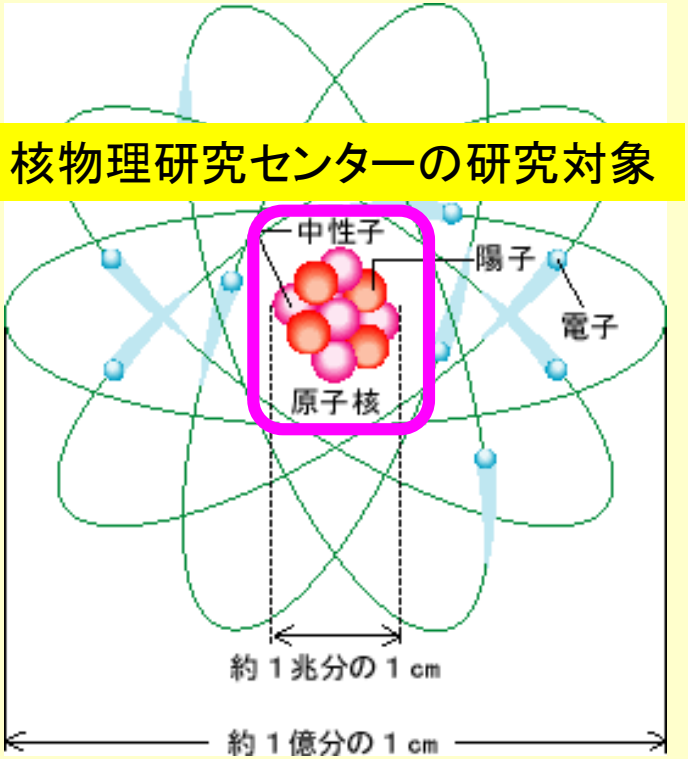
  ※理論と実験の連携による未踏領域の探究
- 加速器技術や放射線計測技術の学際的応用。
- 原子核・放射線の専門知識を活かした社会貢献

・医学・医療応用研究
　アルファ線核医学治療や核医学検査用薬剤開発の基礎研究にRIを供給
　ホウ素中性子捕捉療法（BNCT）のための中性子源開発
　粒子線治療用加速器・照射システム開発　など
・半導体デバイスのソフト＆ハードエラー評価試験への白色中性子供給
・福島での放射線教育・汚染分布測定、核燃料廃棄物の核変換技術開発など

*物質の階層構造の起源をたどる



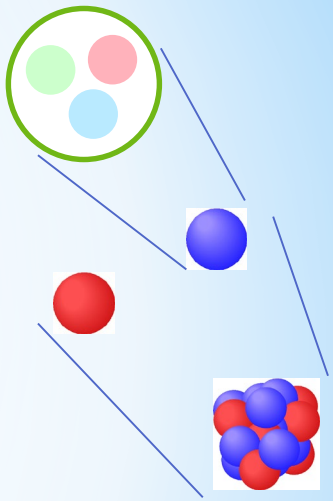




*原子核物理が解き明かすものとは・・・

- クオークからいかにして
  ハドロン（陽子や中性子の仲間）ができるのか。

- 核子（陽子や中性子）から
  いかにして原子核ができるのか？



構成要素：	陽子と中性子（核子）
力：	核力（湯川秀樹先生が阪大在職中に考案） ※電磁気力の100倍
大きさ：	数fm（原子の1／10万）
質量：	原子とほぼ同じ（原子核＋電子＝原子）
密度：	2×10^{14} g/cm^3 ＝ 2億トン/cm^3

原子核はただの“点”ではない。

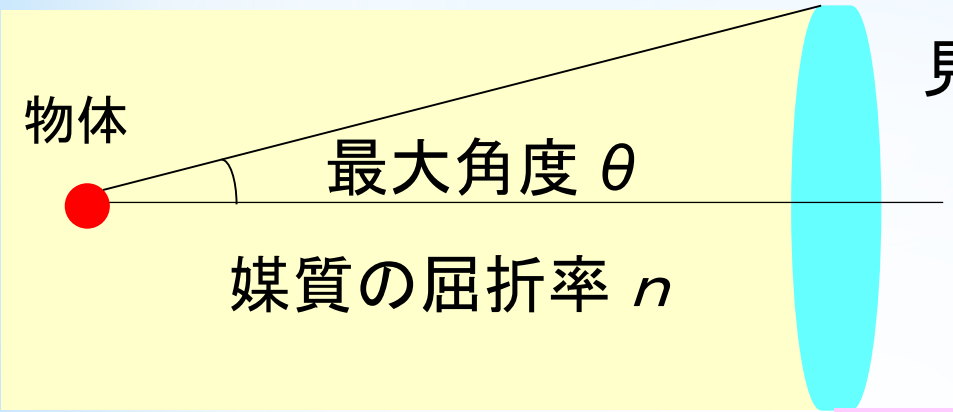
色々な形や運動をしている

液体のような状態、超流動のような状態、気体のような状態

*目に見えない小さなものを見るには？

●ものを見分ける能力：“分解能”

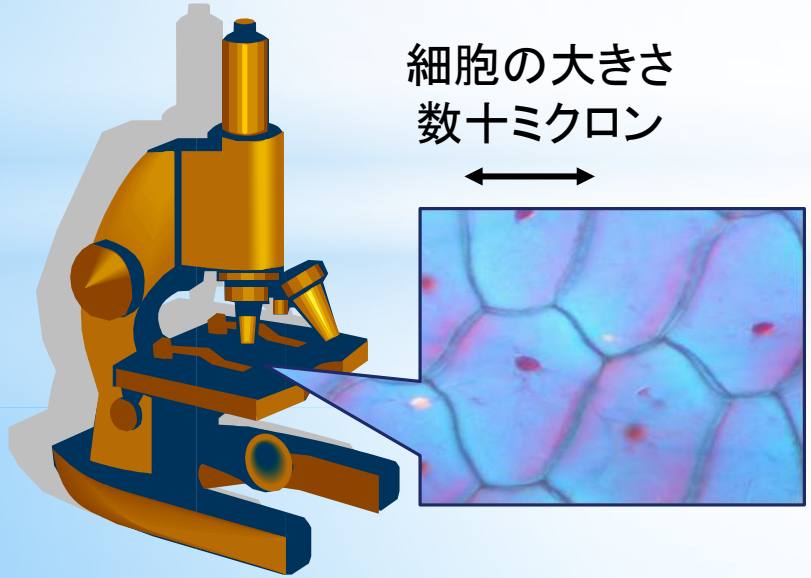
光のレンズの場合



【レーリーの式】

$$\text{見分けられる大きさ} = \frac{0.61 \times \text{光の波長}}{\text{レンズの開口数}} = \frac{0.61 \times \lambda}{n \sin\theta}$$

※光の波長が小さくなればなる程、
小さな世界が見えてくる



可視光の波長は･･･
400～700ナノメートル

↓

光学顕微鏡の分解能は･･･
0.2～1.0ミクロン

*もっと小さな世界をみるには・・・

【レーリーの式】

$$分解能 = \frac{0.61 \times \lambda}{n \sin\theta}$$

・波長を小さく（小さなλ）
・対物レンズを大きく（大きなθ）
・屈折率を大きく（大きなn）

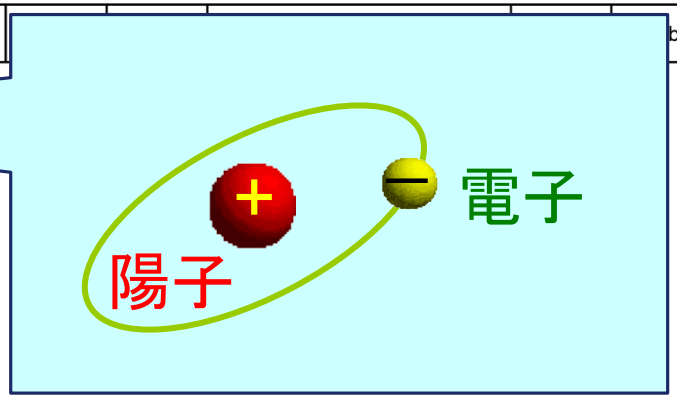
●波長を小さくするには・・・
・波長とエネルギーの関係　【アインシュタインの光量子説】

波長　$\lambda = \frac{hc}{E}$　エネルギーが大きいほど波長が短い！！

原子核のような、とても小さな世界をのぞくために
高速のイオンビームを加速器で作る

＊原子核の世界を覗く道具・・・イオン

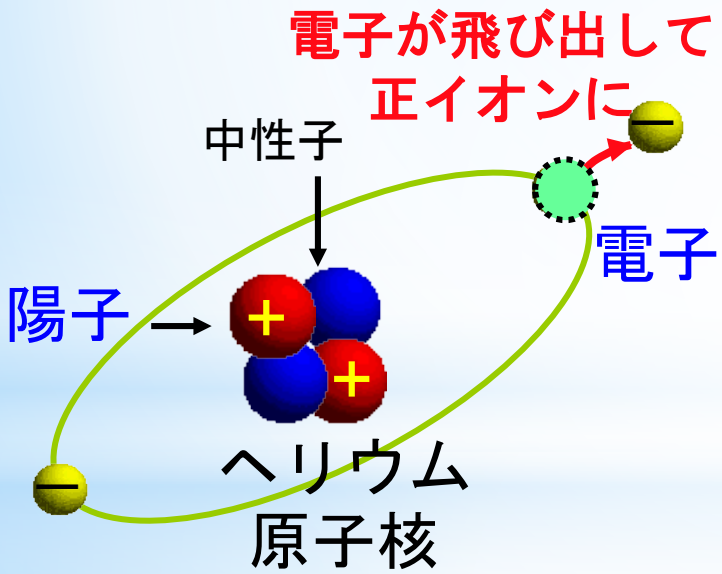
元素の周期表



周期＼族	Ⅰa	Ⅱa	Ⅲb	Ⅳb	Ⅴb							b	Ⅲa	Ⅳa	Ⅴa	Ⅵa	Ⅶa	O
1	1 H 水素																	2 He ヘリウム
2	3 Li リチウム	4 Be ベリリウム											5 B ホウ素	6 C 炭素	7 N 窒素	8 O 酸素	9 F フッ素	10 Ne ネオン
3	11 Na ナトリウム	12 Mg マグネシウム											13 Al アルミニウム	14 Si ケイ素	15 P リン	16 S イオウ	17 Cl 塩素	18 Ar アルゴン
4	19 K カリウム	20 Ca カルシウム	21 Sc スカンジウム	22 Ti チタン	23 V バナジウム	24 Cr クロム	25 Mn マンガン	26 Fe 鉄	27 Co コバルト	28 Ni ニッケル	29 Cu 銅	30 Zn 亜鉛	31 Ga ガリウム	32 Ge ゲルマニウム	33 As ヒ素	34 Se セレン	35 Br 臭素	36 Kr クリプトン
5	37 Rb ルビジウム	38 Sr ストロンチウム	39 Y イットリウム	40 Zr ジルコニウム	41 Nb ニオブ	42 Mo モリブデン	43 Tc テクネチウム	44 Ru ルテニウム	45 Rh ロジウム	46 Pd パラジウム	47 Ag 銀	48 Cd カドミウム	49 In インジウム	50 Sn スズ	51 Sb アンチモン	52 Te テルル	53 I ヨウ素	54 Xe キセノン
6	55 Cs セシウム	56 Ba バリウム	57-71 La-Lu ランタニド	72 Hf ハフニウム	73 Ta タンタル	74 W タングステン	75 Re レニウム	76 Os オスミウム	77 Ir イリジウム	78 Pt 白金	79 Au 金	80 Hg 水銀	81 Tl タリウム	82 Pb 鉛	83 Bi ビスマス	84 Po ポロニウム	85 At アスタチン	86 Rn ラドン
7	87 Fr フランシウム	88 Ra ラジウム	89-103 Ac-Lr アクチニド	104 *	105 *	106 *												

*イオンをつくる

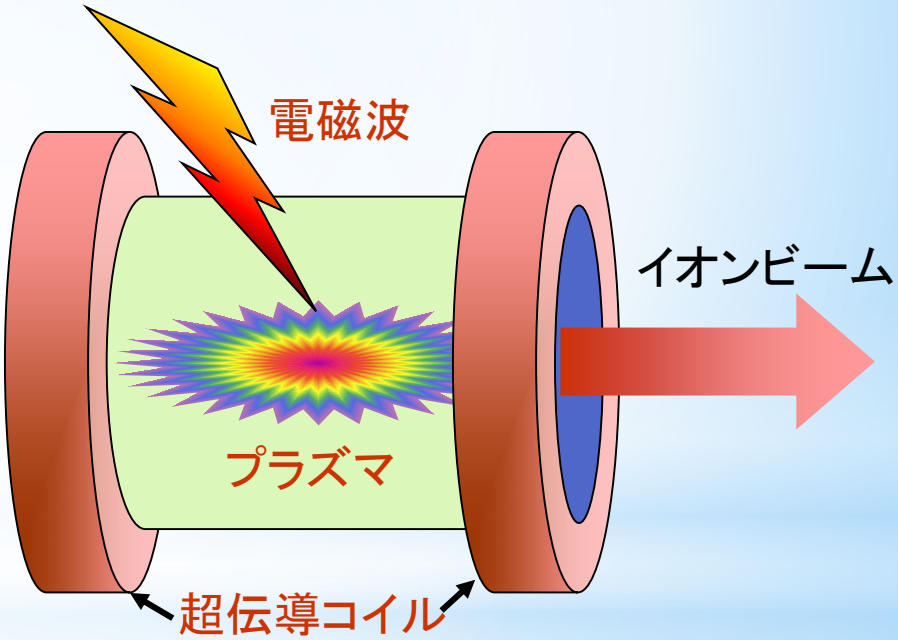
プラスの電気を帯びた
イオンを作る



原子の大きさ;1千万分の1mm（10^{-10}m）
（毛髪の太さの百万分の1）

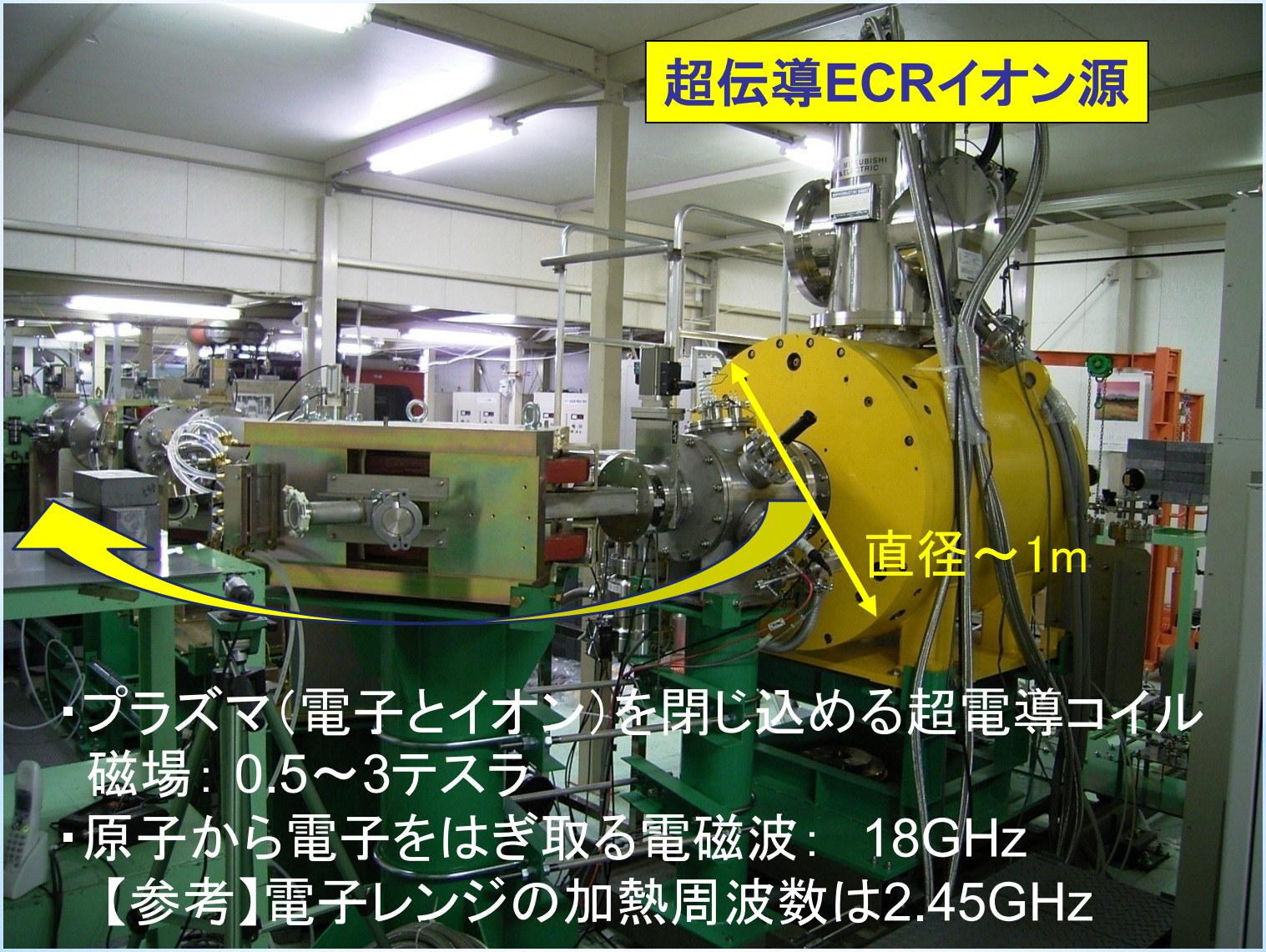
ECRイオン源の原理

強力な電磁波（マイクロ波）で電子を加速して原子に衝突させ、電子をはぎとる（電離）



強力な磁場を発生させて電子とイオンを閉じ込め、何度も電子がイオンと衝突してたくさんの電子をはぎ取る
【電子サイクロトロン共鳴】

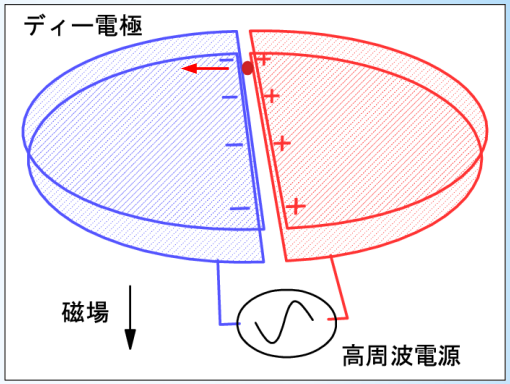
イオンをつくるイオン源

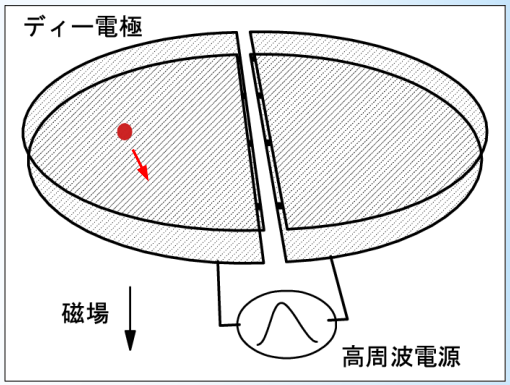


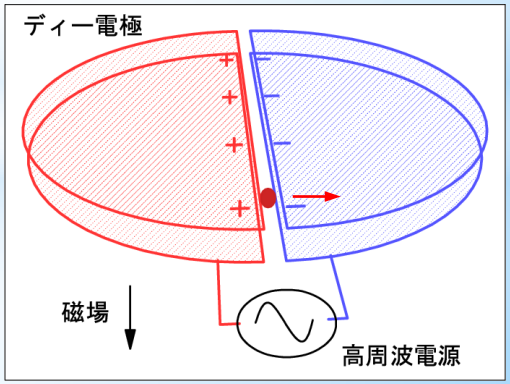
・プラズマ（電子とイオン）を閉じ込める超電導コイル
　磁場：0.5～3テスラ
・原子から電子をはぎ取る電磁波：　18GHz
　【参考】電子レンジの加熱周波数は2.45GHz

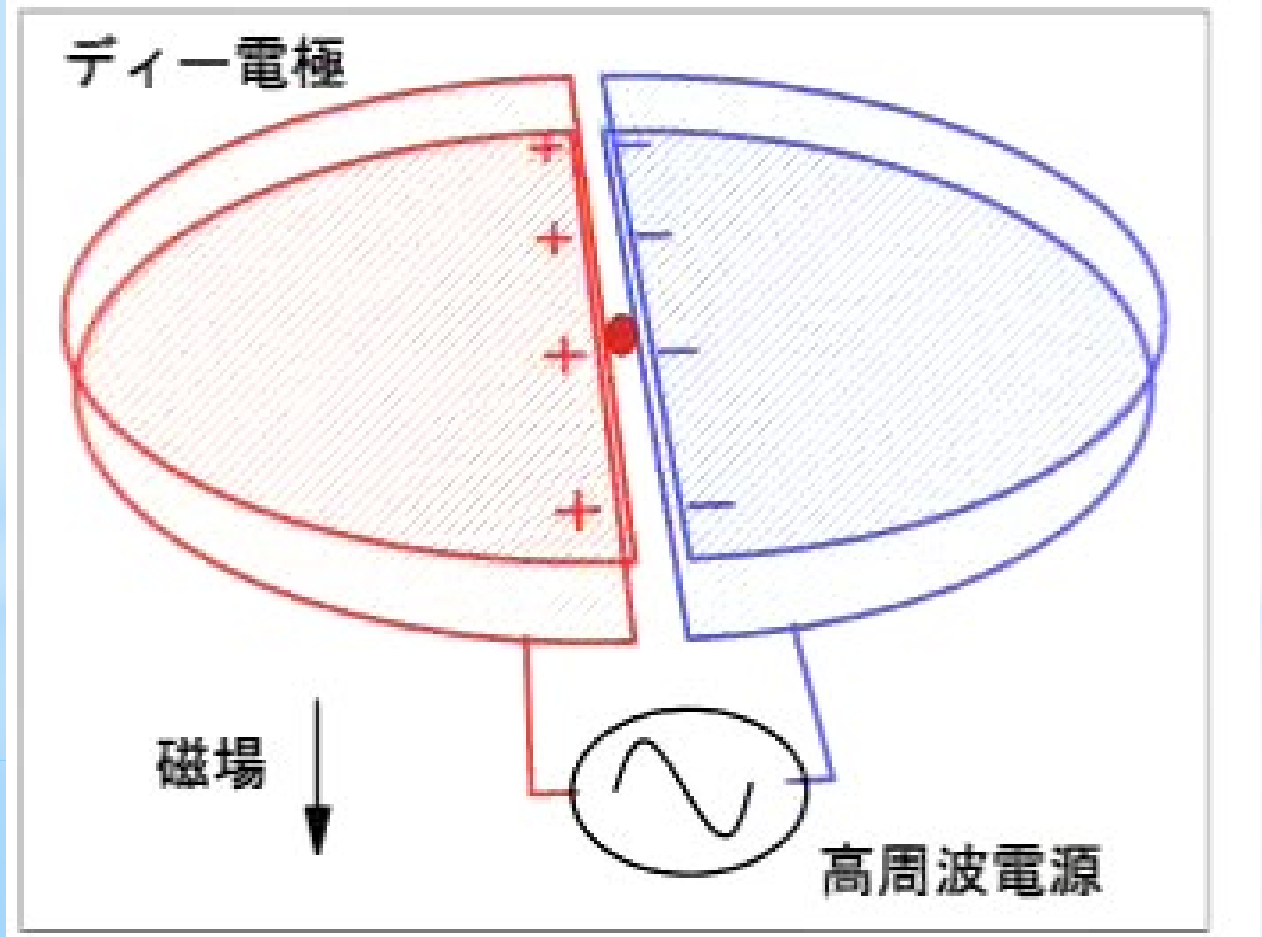
*サイクロトロンでイオンを加速する

- イオンは一様な磁場の中を円運動します
- 一組の電極に高周波電圧を発生させます
- その電極のすき間にできた電場で周期的に繰り返し加速していきます









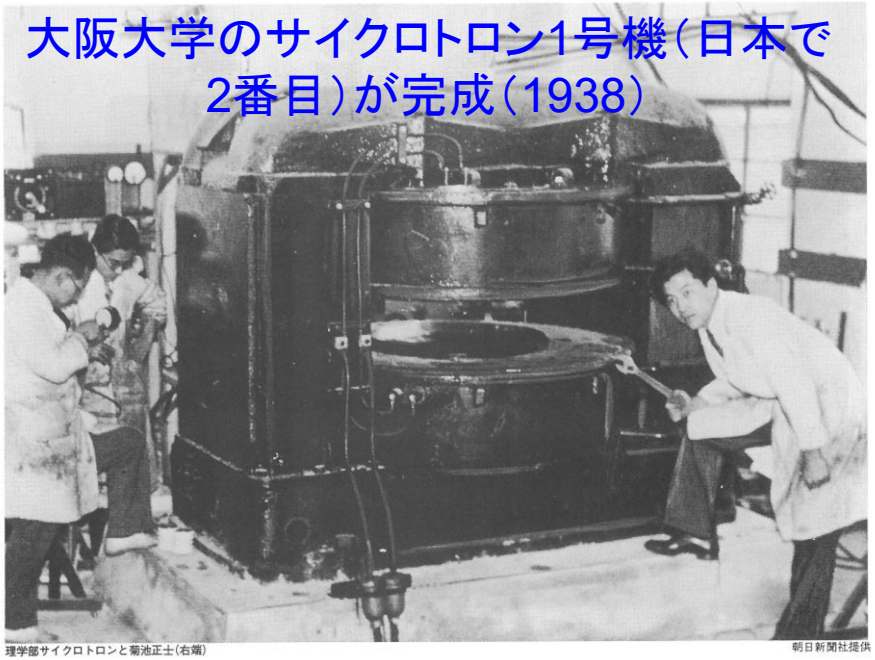
* RCNPサイクロトロン施設

* 日本におけるサイクロトロンの歴史

1932　ローレンス教授が世界初のサイクロトロンを完成させ、加速に成功
1937　日本初（世界で2番目）のサイクロトロンが仁科芳雄博士により理研で完成
1938　日本で2番目のサイクロトロンが菊池正士教授により大阪大学で開発
1957　大阪大学の2号機が中之島キャンパスに設置
1961　室戸台風2号によりサイクロトロンが浸水
1964　サイクロトロンを豊中キャンパスに移設
1971　核物理研究センターを設立
1973　核物理研究センターにAVFサイクロトロンが完成
1976　共同利用実験開始
1991　リングサイクロトロンが完成

菊池正士教授

大阪大学のサイクロトロン1号機（日本で2番目）が完成（1938）



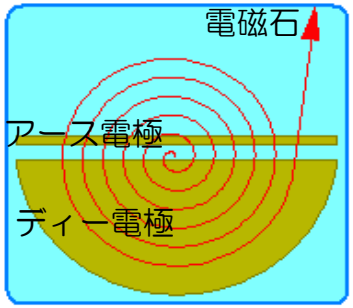
理学部サイクロトロンと菊池正士（右端）　朝日新聞社提供

＊ＡＶＦサイクロトロン
（K140）

H31年度に加速器を停止し、
アップグレードを予定

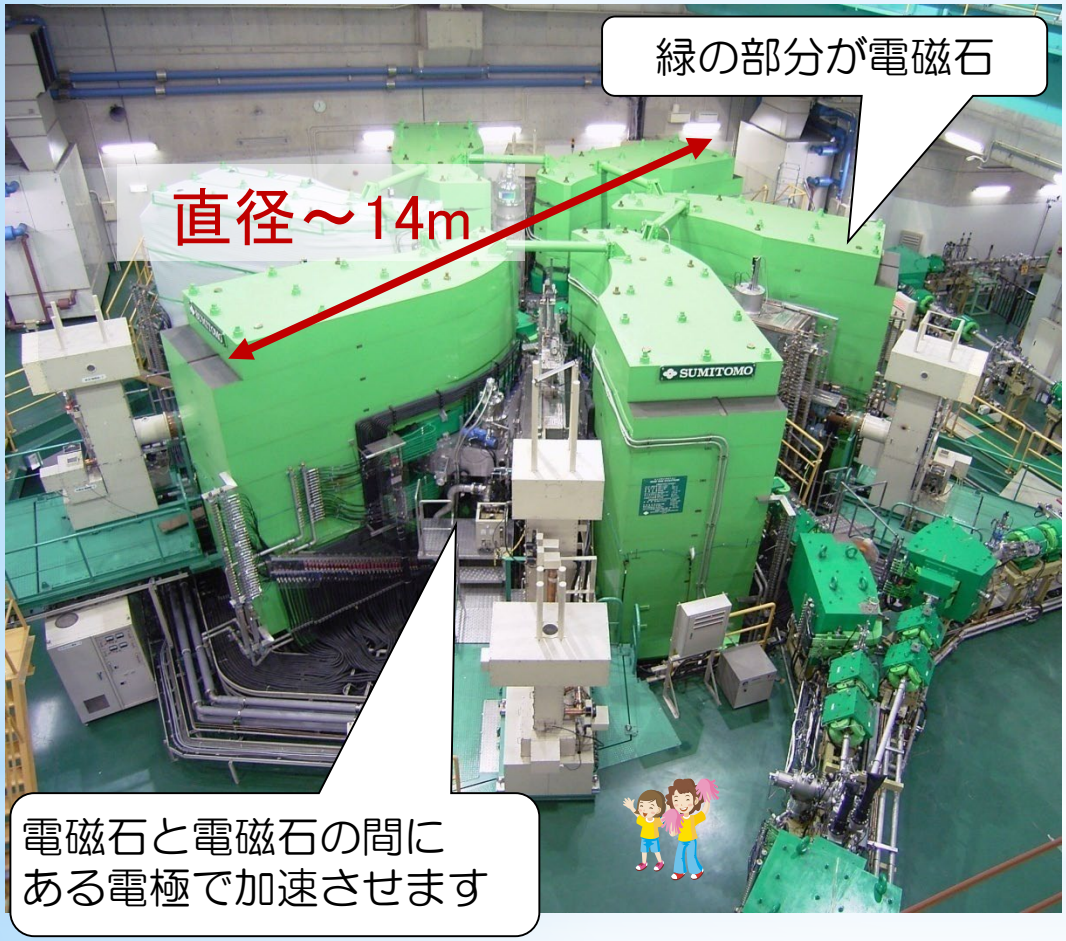
- まず、イオンはAVFサイクロトロンで加速されます。
- AVFサイクロトロンでは陽子(p)や重陽子(d)、アルファ粒子(α)などのさまざまなイオンを加速することができます。
- 陽子の場合では最高秒速12万km(光速の40%)まで加速することができます。
- ここで加速したイオンは、実験室へ運ばれて実験に使われたり、次のリングサイクロトロンに送られてさらに加速されることになります。

共振器
　加速周波数：6～18MHz
　加速電圧：最大60kV
電磁石
　重さ：400トン
　磁場：最大1.6テスラ



- AVFサイクロトロンは上から見ると左のようになっています。
- イオンは電極と電極の間で加速されます。
- 電磁石は、イオンをぐるぐると円を描くように運動させるための磁場を発生させます。

＊リングサイクロトロン
（K400）



- AVFサイクロトロンから出たイオンをさらに加速するため、リングサイクロトロンに送ります。
- リングサイクロトロンでは陽子を最高秒速21万km(光の速さの70%)まで加速できます。
- このリングサイクロトンは２つの世界最高の性能を誇っています。
- その1つは「エネルギー幅」。ひとつひとつの粒子の持っているエネルギーのバラつきを0.01%以下にすることに成功しました。
- もう1つは「磁場の安定性」。きちんと加速するためには電磁石が常に同じ磁場を保っていなければなりません。ここでも磁場の変化の度合が0.001%以下という、とても小さな値にすることに成功しています。

共振器
　加速周波数：30～52MHz
　加速電圧：最大500kV

電磁石6台
　重さ：2200トン
　磁場：1.75テスラ

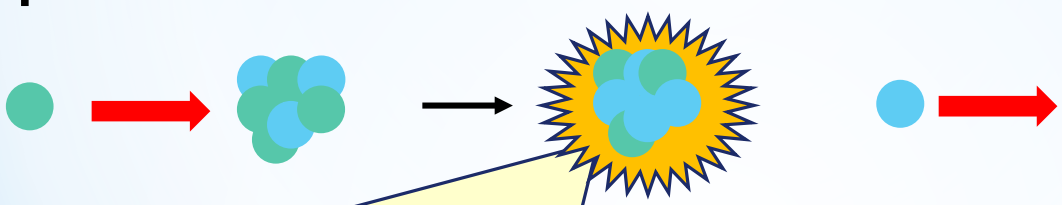
*原子核反応とは？

・原子核同士が衝突して起きる反応

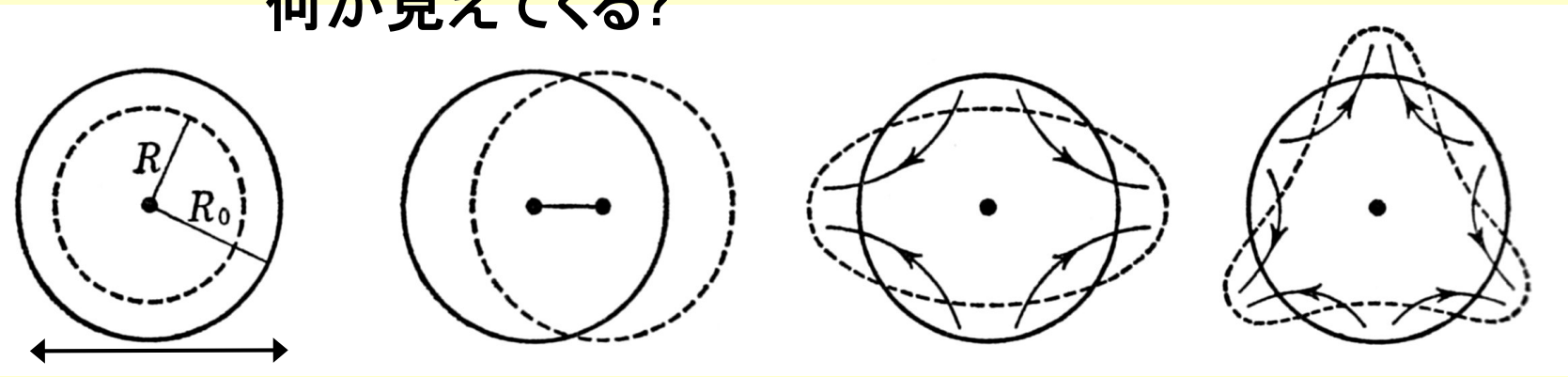
・その際、エネルギーを持った粒子が放出される

・原子核反応の例

$$p + {}^{58}Ni \longrightarrow {}^{58}Cu + n$$



何が見えてくる?

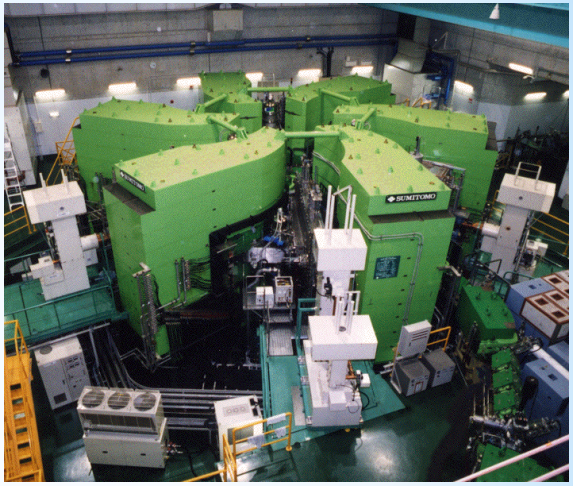


10^{-14} ~10^{-15} m

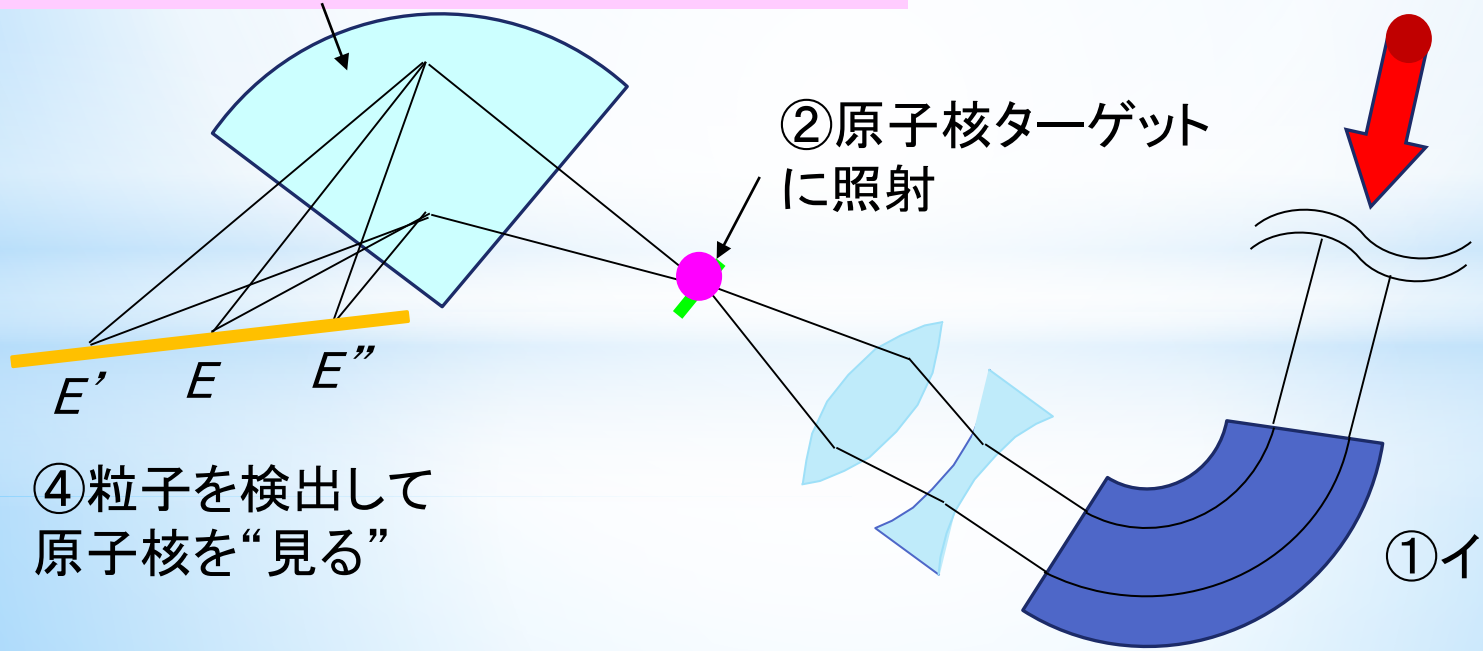
反応後の原子核の振る舞い（振動）

どうやって原子核を見る？

リングサイクロトロン



③高分解能スペクトロメータで分析
“大雷電（グランド・ライデン）”

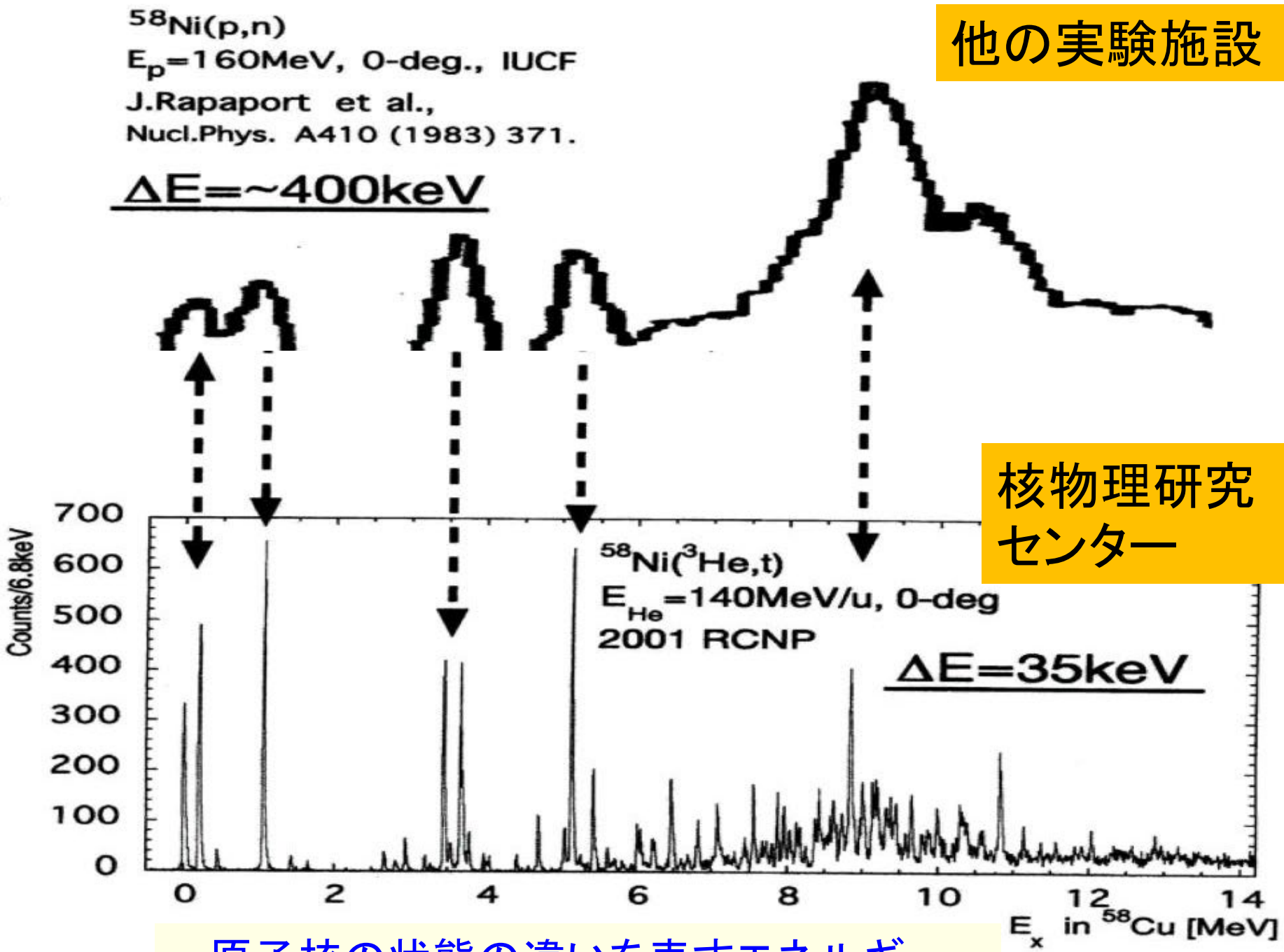


②原子核ターゲット
に照射

④粒子を検出して
原子核を“見る”

①イオンを輸送

他の実験施設



核物理研究センター

原子核の状態の違いを表すエネルギー

*加速器応用の最前線

＊競争的資金による加速器応用研究の推進

●科研費新学術領域研究（研究領域提案型）
『学術研究支援基盤形成』
「短寿命RI供給プラットフォーム」（H28～H30～H33？）

●JST産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムOPERA
「安全・安心・スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出」（H29～H33）

●JST革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）
『核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化』
「加速器ベースの高強度小型冷・熱中性子源によるLLFP核種核変換処理法の研究」（H27～H30）

短寿命RI供給プラットフォーム

科研費を獲得している研究課題に対して、年間を通じた短寿命RIの安定供給とRIの安全な取り扱いのための技術的な支援を行う.

- 日本アイソトープ協会などから購入できない短寿命RIの供給.
- 世界最高レベルの加速器施設の連合体による速やかで安定な供給.
- 共同利用・共同研究拠点である阪大RCNPに窓口を一元化、利便性を格段に改善し、利用者を拡大.
- 幅広い分野の基礎研究の推進を支援：次世代PET用プローブの開発、次世代RI治療薬の開発、生体微量元素の代謝研究など.

日本アイソトープ協会による RI有償頒布との相違点

- 本事業は，日本アイソトープ協会などから購入可能な既に市場にある放射性同位体（RI）を基本的に対象外としている.

日本アイソトープ協会		本事業	
核種*	半減期	核種	半減期
^{65}Zn	243.9 日	^{67}Cu	61.9 時間
^{85}Sr	64.8 日	^{89m}Zr	4.2 分
^{88}Y	106.6 日	^{211}At	7.2 時間
^{109}Cd	461.4 日	^{261}Rf^{a}	70 秒

*本事業の参画機関から日本アイソトープ協会を経由して有償頒布しているRIは，現時点では表に示した4核種のみである.

学術会議の提言

提言

大学等における非密封放射性同位元素
使用施設の拠点化について

短寿命RI供給プラットフォームの
取り組みを取り上げて頂いた

平成２９年（２０１７年）９月６日
日　本　学　術　会　議

基礎医学委員会・総合工学委員会合同
放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会

この提言は、日本学術会議基礎医学委員会・総合工学委員会合同　放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会の審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議基礎医学委員会・総合工学委員会合同
放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会

委員長	柴田　徳思	（連携会員）	株式会社千代田テクノル大洗研究所所長、東京大学名誉教授、高エネルギー加速器研究機構名誉教授、総合研究大学名誉教授
副委員長	神田　玲子	（連携会員）	量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所放射線防護情報統合センター長
幹　事	神谷　研二	（第二部会員）	広島大学副学長・原爆放射線医科学研究所教授
幹　事	竹田　敏一	（連携会員）	福井大学付属国際原子力工学研究所特任教授
	中嶋　英雄	（第三部会員）	公益財団法人若狭湾エネルギー研究センター所長
	遠藤　啓吾	（連携会員）	京都医療科学大学学長
	甲斐　倫明	（連携会員）	大分県立看護科学大学教授
	唐木　英明	（連携会員）	公益財団法人食の安全・安心財団理事長
	櫻井　博儀	（連携会員）	東京大学大学院理学系研究科教授、理化学研究所主任研究員
	佐々木康人	（連携会員）	湘南鎌倉総合病院付属臨床研究センター放射線治療研究センター センター長
	山本　一良	（連携会員）	名古屋学芸大学副学長・教授、名古屋大学名誉教授

本提言の作成にあたり、以下の職員が事務及び調査を担当した。

事務	石井　康彦	参事官（審議第二担当）（平成 29 年７月まで）
	粂川　泰一	参事官（審議第二担当）（平成 29 年７月から）
	松宮　志麻	参事官（審議第二担当）付参事官補佐（平成 29 年７月まで）
	高橋　和也	参事官（審議第二担当）付参事官補佐（平成 29 年７月から）
	柳原　情子	参事官（審議第二担当）付審議専門職

＊競争的資金による加速器応用研究の推進

●科研費新学術領域研究（研究領域提案型）
『学術研究支援基盤形成』
「短寿命RI供給プラットフォーム」（H28～H30～H33？）

●JST産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムOPERA
「安全・安心・スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出」（H29～H33）

●JST革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）
『核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化』
「加速器ベースの高強度小型冷・熱中性子源によるLLFP核種核変換処理法の研究」（H27～H30）

加速器の産業応用の拡がり

RI利用

RI生成

Target

RI精製

診断・治療

植物や環境中の元素移行分析

陽子・重陽子・^{4}Heビーム

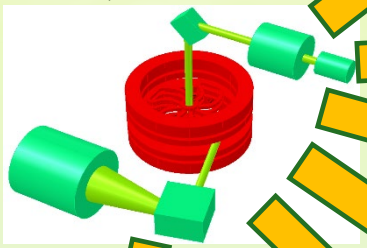
2次粒子生成

Target

RI

中性子

サイクロトロン



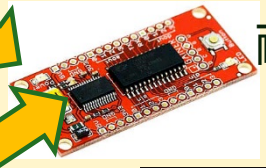
陽子・重陽子ビーム

二次粒子利用

BNCT

Target

中性子



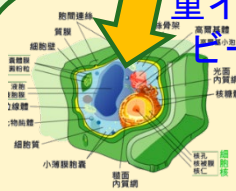
半導体デバイス
耐放射線評価試験

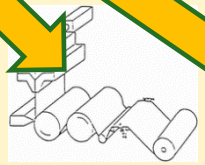
2次粒子生成

ミューオン

元素分析・評価

重イオンビーム





粒子線治療
植物育種
生物影響

高機能材料創製
ナノワイヤー
穿孔フィルム

イオンビーム利用

JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム(OPERA)

安心・安全・スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出

超スマート社会の安全基盤を支えるソフトエラー対策

健康長寿社会実現のためのアルファ線核医学治療の開発

キーテクノロジー1
量子や短寿命RIの安定供給

キーテクノロジー2
高度な放射線防御技術

キーテクノロジー3
短寿命RIの医療利用

キーテクノロジー4
放射線測定技術の高度化

研究開発課題1
小型加速器・照射技術の高度化

研究開発課題2
短寿命RIの製造・分離

研究開発課題3
小型加速器中性子ビーム利用方法論の確立

研究開発課題4
半導体ソフトエラー評価技術の確立

研究開発課題5
難治性がん制圧のための短寿命RI標識分子の合成

研究開発課題6
放射性薬剤の取扱安全基準の構築

研究開発課題7
高分解能イメージングのための放射線測定器の開発

研究開発課題8
短寿命治療用RI製剤の臨床応用に向けての基盤整備研究

量子アプリ共創コンソーシアム ［量子アプリ共創協議会］

【幹事機関】
大阪大学

【民間企業】
㈱京都メディカルテクノロジー／HIREC㈱／イーピーエス㈱ ／㈱トヨタ自動車／㈱金属技研／シマフジ電機㈱／富士電機㈱／㈱ソシオネクスト／中部電力㈱ ／㈱アトックス／㈱日立製作所／㈱日本メジフィジックス／㈱住友重機械工業／㈱富士フイルムRIファーマ

【大学等・研究開発】
理化学研究所／名古屋大学／九州大学／東北大学サイクロトロンRIセンター／東北大学電子光理学研究センター／京都工芸繊維大学 ／量子科学技術研究開発機構／日本原子力研究開発機構／J-PARCセンター／早稲田大学

量子アプリ共創コンソーシアムと資金・知・人材の好循環

- 幹事機関における知的財産の一元管理と経費の見える化
- 公開シンポジウムの開催

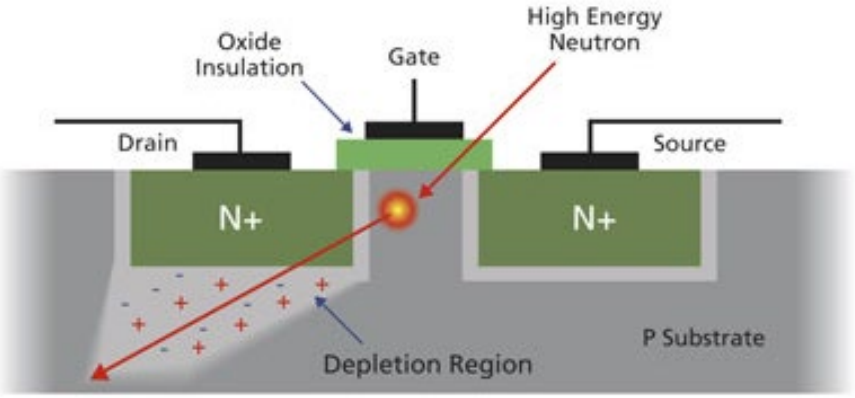
- RA雇用経費や加速器運転経費等の積算根拠の見える化

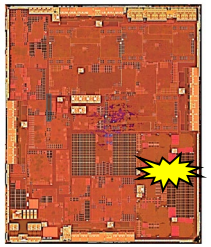
- クロアポ制度の充実（大学・企業間）
- インターンシップ制度の導入

1. 超スマート社会の安全基盤を支える ソフトエラー対策

宇宙線とソフトエラー

中性子やミューオンが半導体中で原子核反応を起こし、生成された荷電粒子がごく稀にビット反転を起こす：0 → 1 or 1 → 0





半導体デバイスの微細化
ソフトエラー　＞　ハードエラー

完全自動走行（2025年頃に実現）では重大な事故を招きかねない.

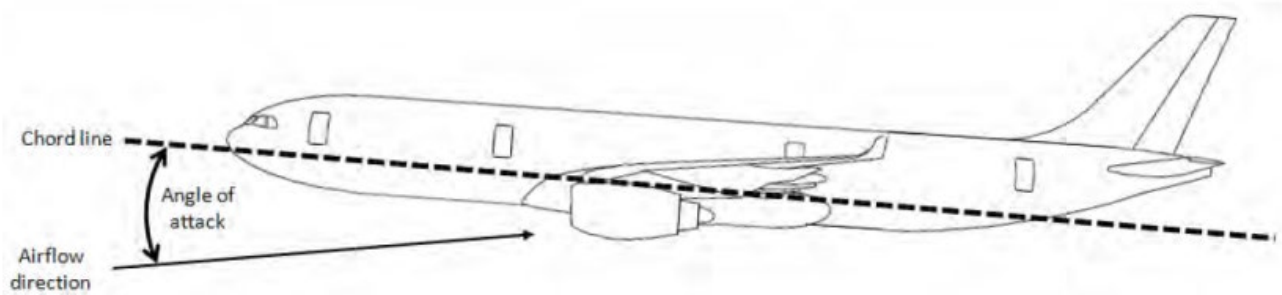
その大切な信頼性を脅かすソフトエラー

- 典型的なソフトエラーの例
  - 装置警報が頻発
  - 異常動作や通信障害が発生し、システムダウン
  - 制御プログラムが壊れて、制御不能に・・・
  - 致命的なエラーが起こったことがわからず、システムが動き続ける（サイレントエラー）

- 工場に持ち帰って調べても、障害が再現しない！
- 出回る機器の数が増えてから問題が顕在化！

航空機への放射線の影響

- フライバイワイヤの制御システム故障により急降下
  - 2008年10月Airbus A330
  - 1/3の乗客と3/4の乗員が怪我



ソフトエラーの脅威に対する対策は

1. システムのリセット、再起動
2. エラーの自動検知、自動修復
3. システムの冗長化（二重化、三重化）
4. ソフトエラー耐性の強いデバイス・回路の開発

必要性、効果の確認のために、SERの測定が必要

日常家電は、1の対応で十分。電源が切ることができない（通信機器）、数が膨大（IoT/IoE）、もしくは発生した場合の影響が甚大（自動運転車）な場合は2~4の対応が必要.

事前の対策がうまくいった例

:

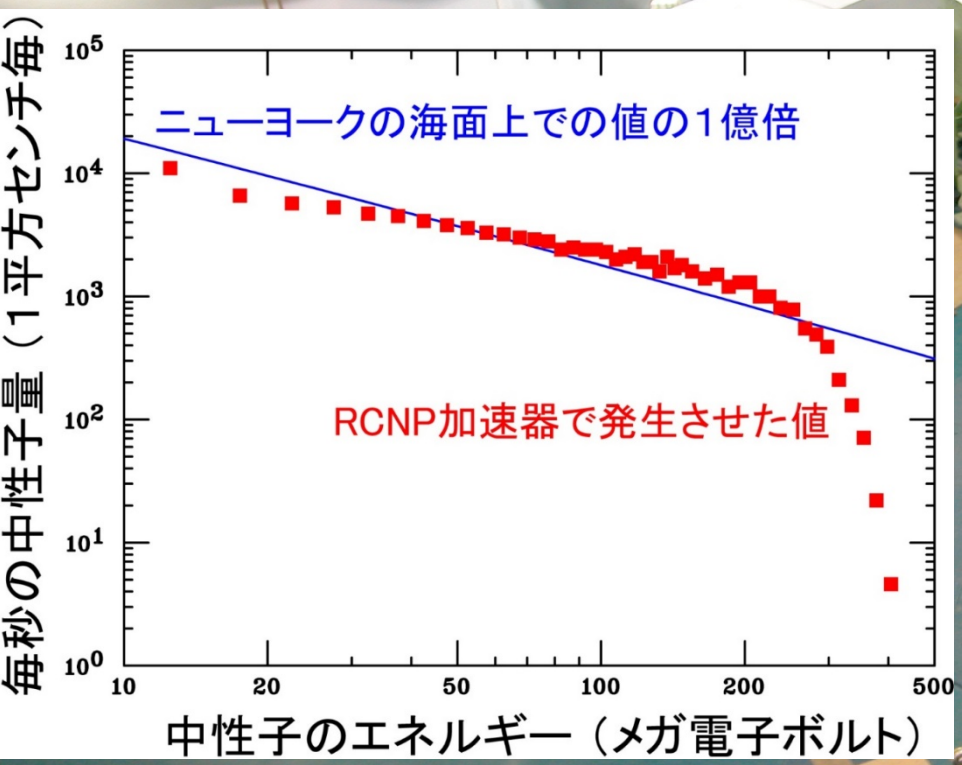
RCNPでコンポーネントのソフトエラーレート(SER)を測定→2~4の対応策を全て実施

⇨ 回路やシステム設計の変更などに伴う膨大なコストと時間の発生を回避.

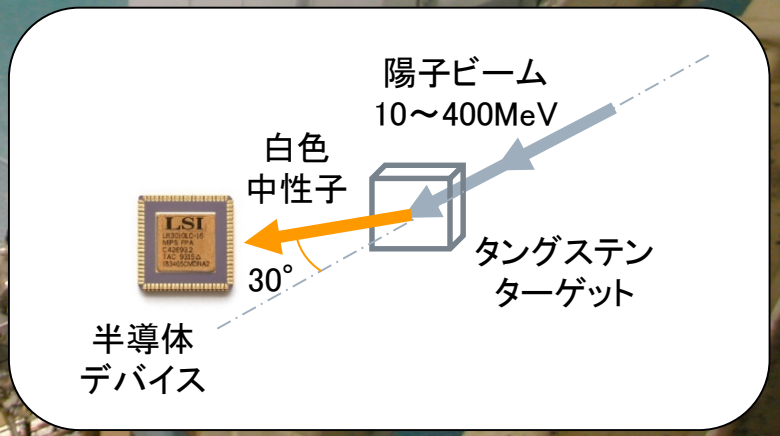
RCNP 白色中性子照射場

実測値 ⇔ 比較

$$\mathrm{SER} = \int \sigma_{SEU}(E_n)\phi(E_n)dE_n$$



中性子



- RCNPの白色中性子源の強度は16秒で自然界の100年分に相当→2年後に10倍に増強

２．健康長寿社会実現のための アルファ線核医学治療の開発

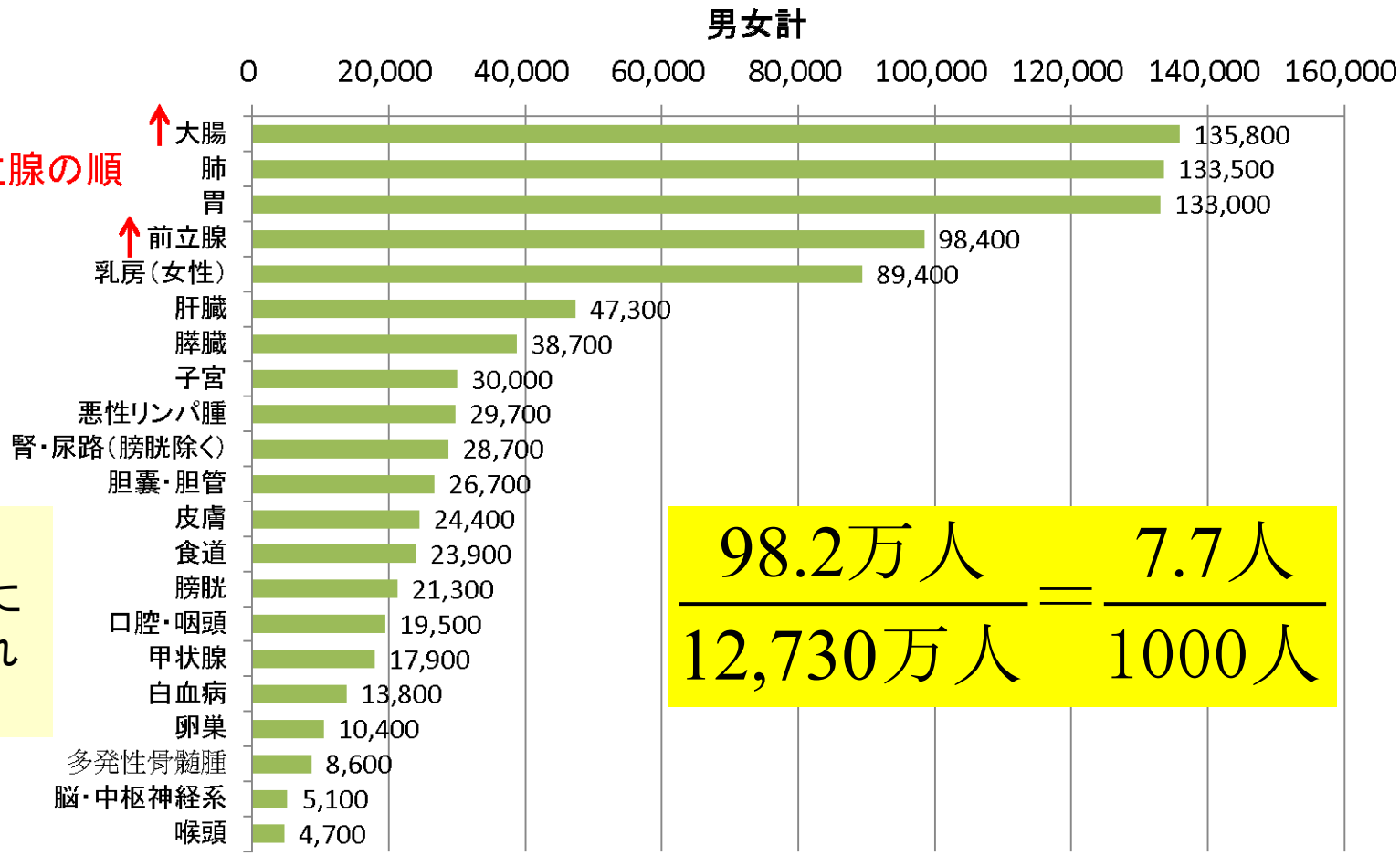
大阪大学 OSAKA UNIVERSITY

2015年のがん罹患予測

※独立行政法人国立がん研究センター がん対策情報センターによる「2015年のがん統計予測」

- 予測がん罹患数は982,100例（男性560,300例、女性421,800例）
- 2014年の予測値と比べると約10万例増加
- 大腸、肺、胃、前立腺、乳房（女性）の順に罹患数が多い（大腸、前立腺が↑）

2014年予測では
胃、肺、大腸、
乳房（女性）、前立腺の順



【罹患数】
ある年に新たにがんと診断される数

$$\frac{98.2\text{万人}}{12{,}730\text{万人}} = \frac{7.7\text{人}}{1000\text{人}}$$

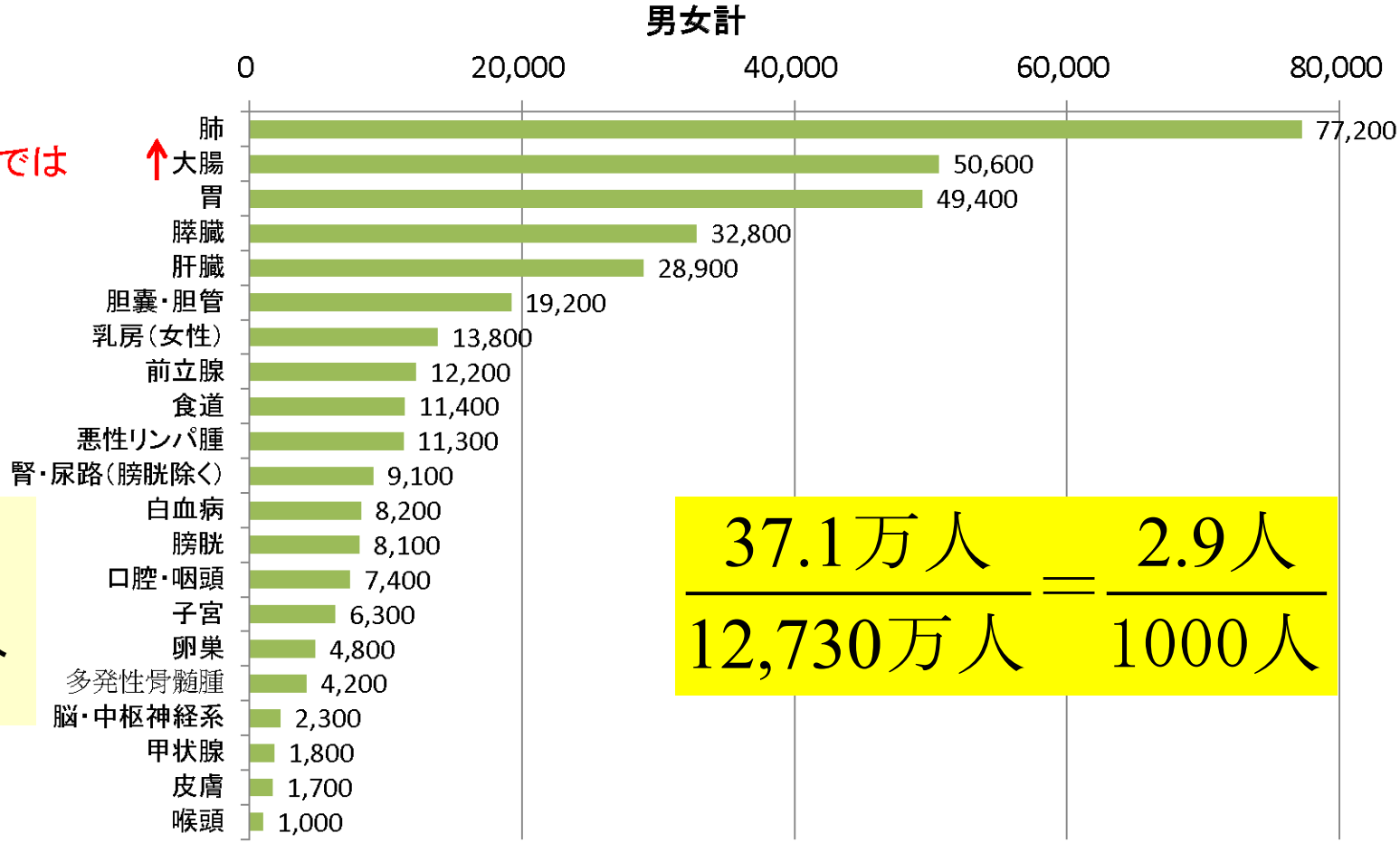
大阪大学 OSAKA UNIVERSITY

2015年のがん死亡予測

※独立行政法人国立がん研究センター がん対策情報センターによる「2015年のがん統計予測」

- 予測がん死亡数は370,900人（男性219,200人、女性151,700人）
- 2014年の予測値と比べるとほぼ同じ（約4千人増加）
- 肺、大腸、胃、膵臓、肝臓の順に死亡数が多い（大腸が↑）

2014年予測値では
肺、胃、大腸、
膵臓、肝臓



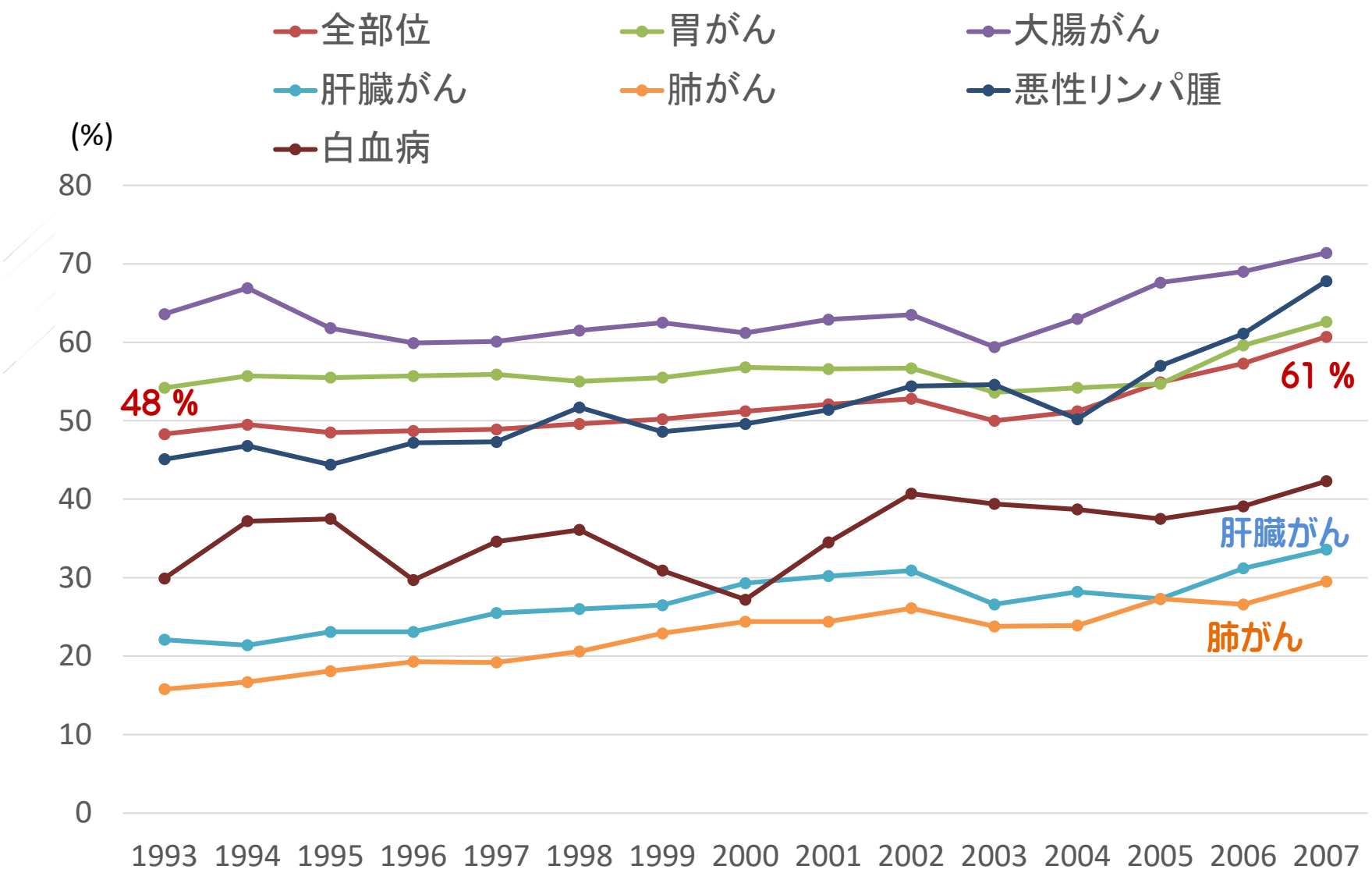
【死亡数】
ある年にがんで亡くなった人の数

$$\frac{37.1\text{万人}}{12{,}730\text{万人}} = \frac{2.9\text{人}}{1000\text{人}}$$

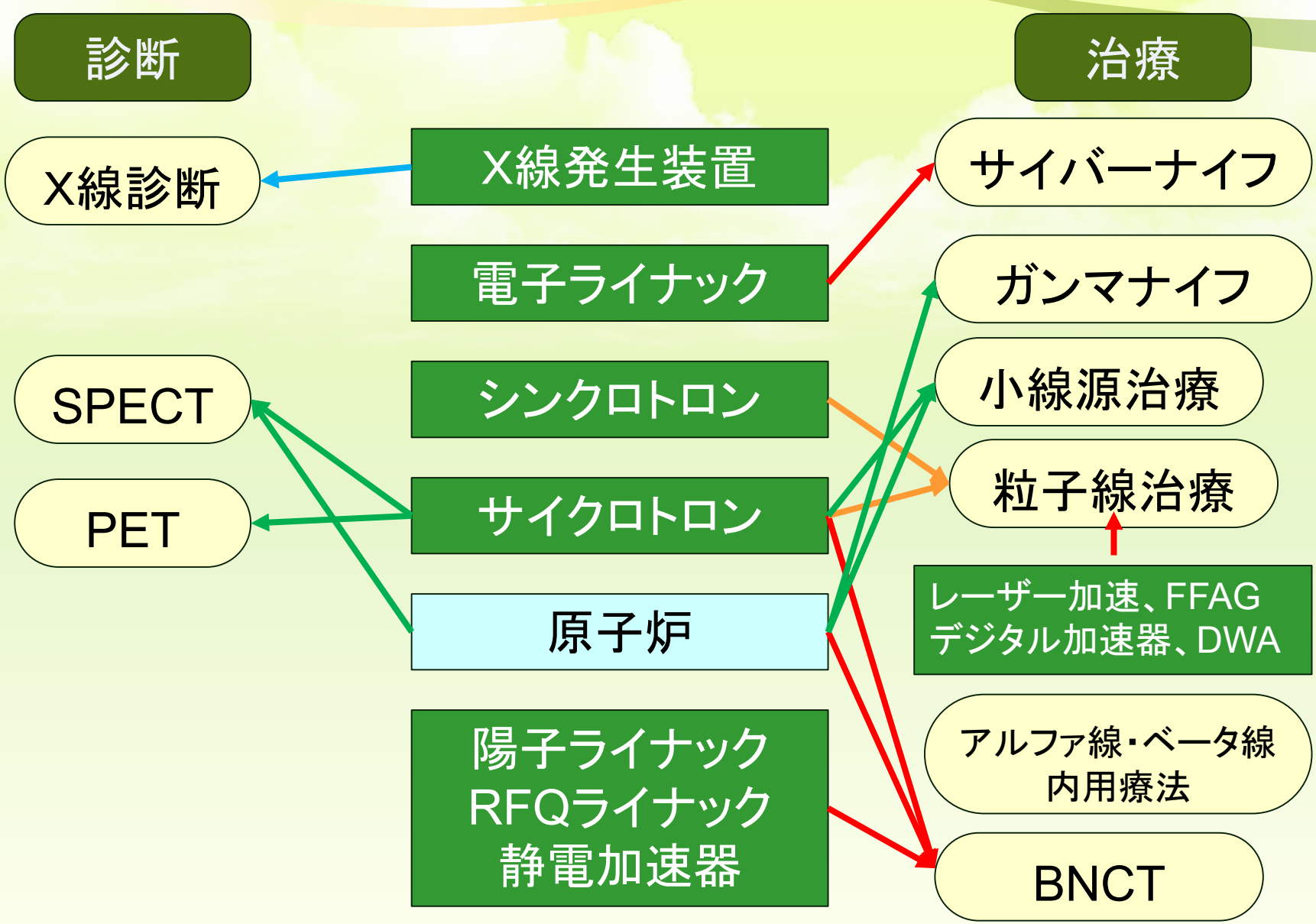
大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

5年相対生存率

※大阪府の地域がん登録データより



加速器・原子炉の医学・医療への応用



サイクロトロンの医療応用

サイクロトロン

RI製造

●診断（核医学検査）
・PET（陽電子）
・SPECT（ガンマ線）
99Mo/99mTc

●治療
・核医学治療
ベータ線
アルファ線

※実用化はこれから
※日本は遅れている

中性子源

熱・熱外中性子照射

●中性子捕捉療法
(BNCT)
・日本　～2施設
～600症例

※現在、治験中
※日本は進んでいる

粒子線治療

●陽子線治療
【3Myen/件】
・日本　～10施設
～10,000症例
・米国　～11施設
～32,000症例
・欧州　～12施設
～16,000症例

●重粒子線治療
【2.8Myen/件】
・日本　～4施設
～8,000症例
・欧州　～4施設
～600症例

医療における放射線の利用

ポジトロン断層撮影（PET）

サイクロトロン

●短寿命ポジトロン放出核種の院内製造を実現

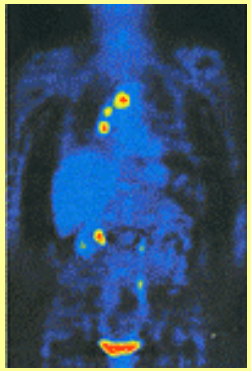
●ポジトロン放出核種の製造
（例：^{18}F　半減期110分）

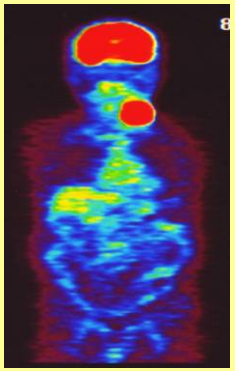
●ポジトロン標識化合物合成

PETの臨床的有用性

- 早期がんの発見
- 良・悪性の鑑別診断
- がんの広がり、病期の診断
- 治療効果の評価
- 再発・転移の診断

PET 装置





^{18} FDGによるがんの発見

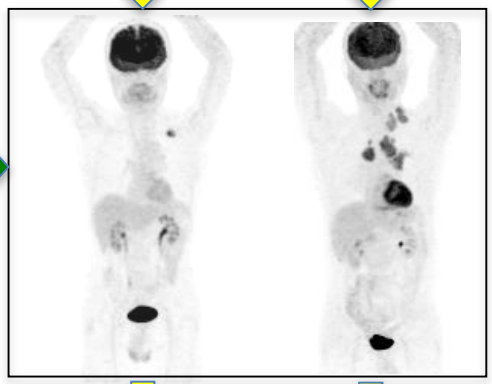
健康長寿社会実現のための難治性がんの制圧

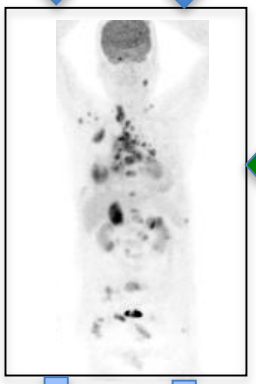
大阪府におけるがん登録年報　第67報
（大阪府健康福祉部、大阪府医師会、大阪府成人病センター）

1/3は初診時にすでに進行がん

臨床進行度	原発臓器限局	所属リンパ節転移	隣接臓器浸潤	遠隔転移
初診時割合	47%	22%	12%	19%

外科的切除
放射線照射
化学療法
免疫療法





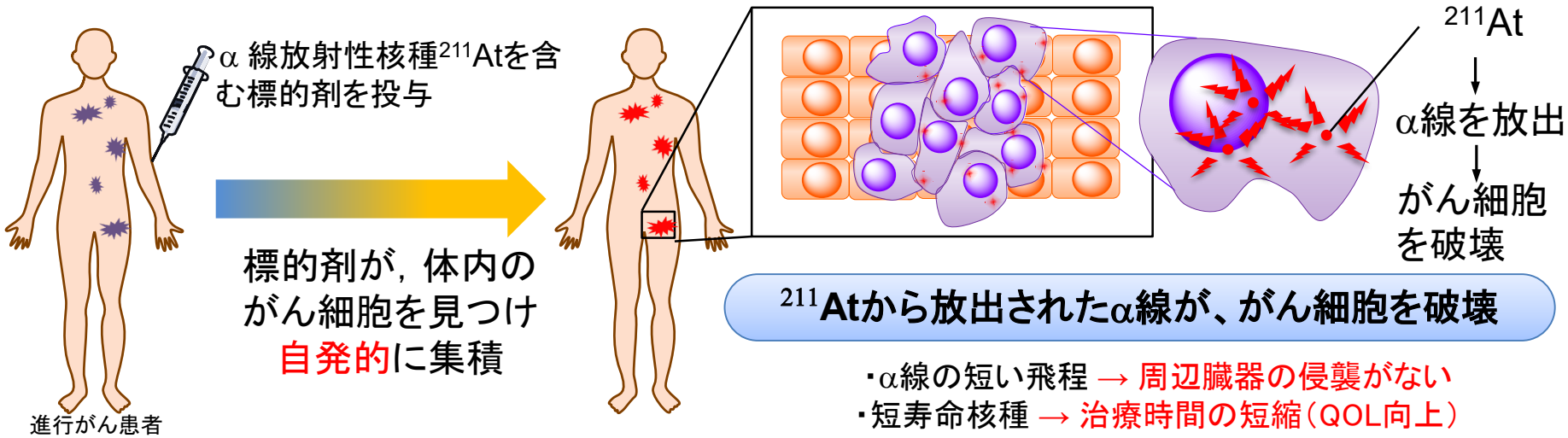
化学療法
免疫療法

5年相対生存率	74.5%	47.2%	17.9%	6.1%

現在の治療では生存率が低い

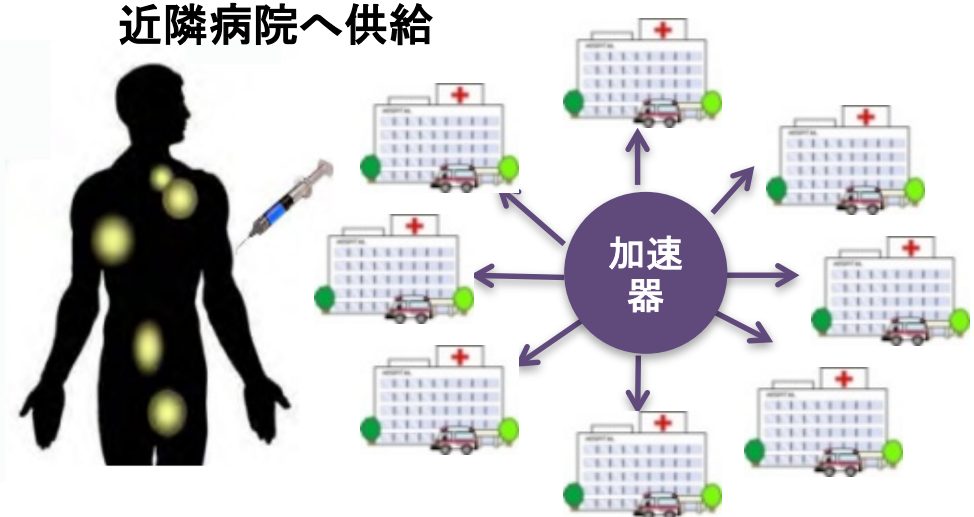
アルファ線核医学治療技術の開発

アルファ線内用療法とは



アスタチン-211(^{211}At):
アルファ線放出核種. 半減期は7.2時間. ハロゲン族元素. 安定同位体がない.

α線内用療法薬を近隣病院へ供給



α線内用療法 X PET

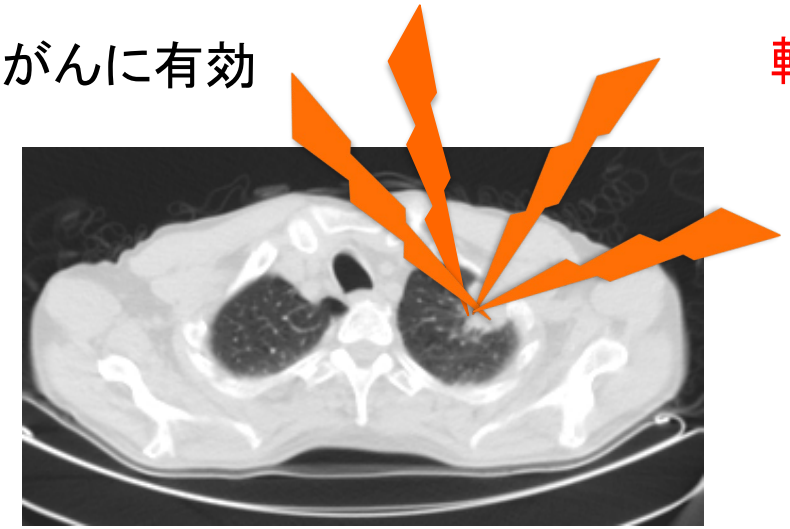
＝診断と治療が直結

重粒子線治療とアルファ線内用療法の違い

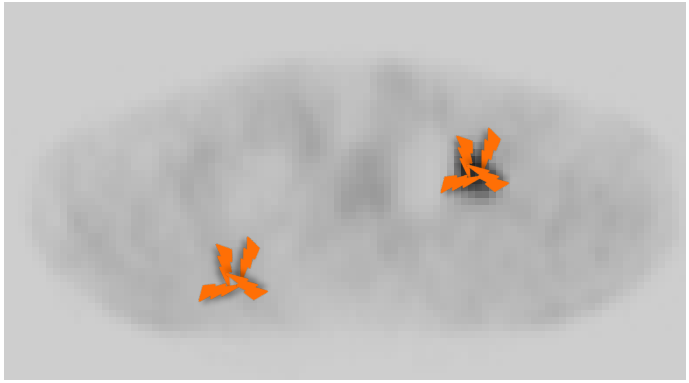
従来の重粒子線治療：
重粒子線加速器による体外からの照射

アルファ線内用療法：
α線放出核種を投与し体内から照射

局所がんに有効



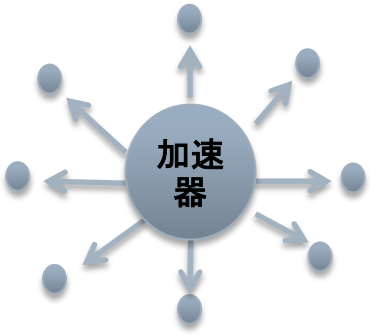
転移性病変に有効



患者さんが移動

患者さんは加速器施設で加療

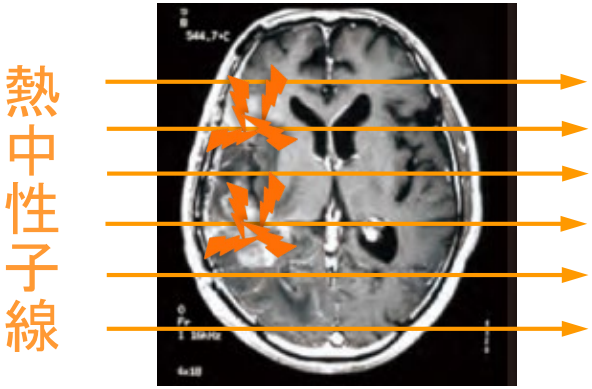
核種を各病院に輸送



患者さんは病院で加療

BNCTとアルファ線内用療法の違い

中性子線補足療法（BNCT）：
腫瘍細胞に取り込ませた^{10}Bと中性子との核反応により発生する強力な粒子線（アルファ線、^{7}Li粒子）によって治療



	アルファ線内用療法	BNCT
必要集積量	極微量	多量（30 ppm以上）
製剤のがん細胞殺傷性	高い	低い （中性子照射下：高い）
DDS戦略	分子標的薬、RI診断薬を利用 （阪大のPET研究成果を利用）	がん細胞への取り込みを利用 （ターゲティング戦略が検討課題）
対象疾患	転移性病変	切除困難ながん
治験	認可済（ゾーフィゴ，^{223}Ra）、 ^{225}Ac分子標的薬が臨床試験	臨床試験中 （脳腫瘍，頭頸部腫瘍）

大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

アルファ線核医学治療のためのAt-211生成

α線放出核種とエネルギー

RI	$T_{1/2}$	Eα (MeV)
Tb-149	4.2 h	4.0
Bi-212	61 min	8.8
Bi-213	46 min	8.4
At-211	7.2 h	5.9, 7.5
Ra-223	11.4 d	5.8
Ra-224	3.66 d	5.8
Ac-225	10 d	5.9

500μAの28MeV 4Heビームで1時間照射した場合、14GBqのAt-211の供給が可能

・^{211}At ←^{4}He 28～29MeV + ^{209}Bi target

※30MeV以上で^{210}At（$T_{1/2}$=8.1hours）が生成されるが、娘核の^{210}Poは有毒であり、半減期が長い（$T_{1/2}$=138.4days）ため、生成は避けるべし

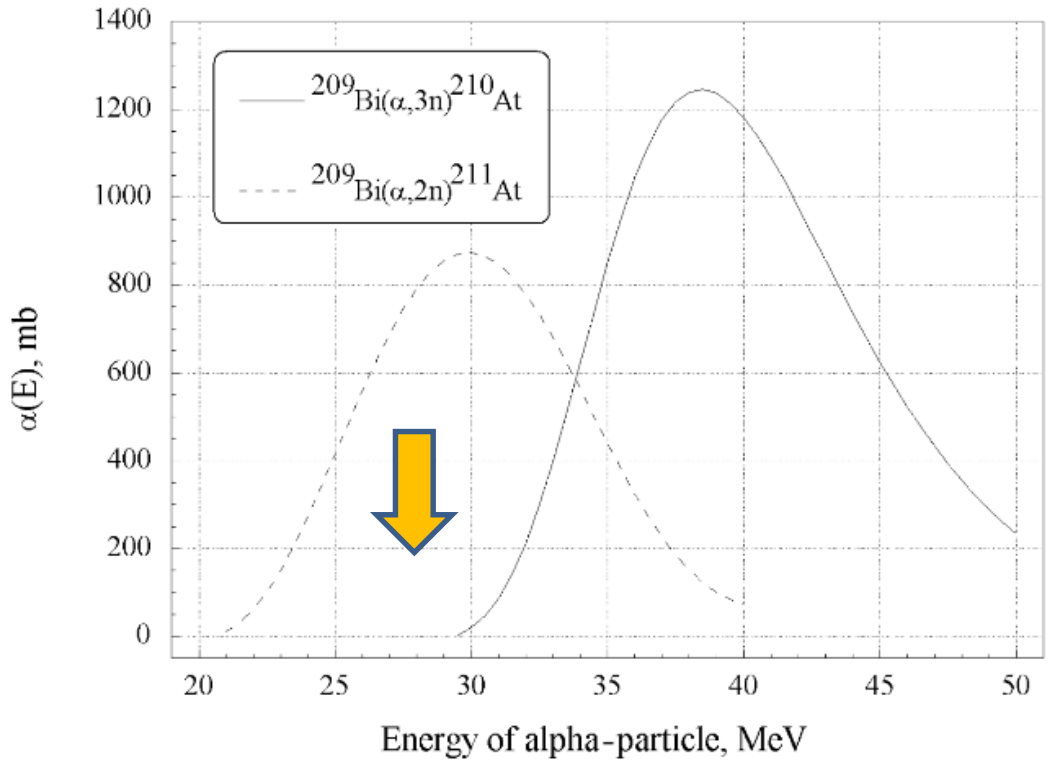


Fig. 2. Fit of the cross section data taken from the literature for the ^{209}Bi(α,2n)^{211}At and ^{209}Bi(α,3n)^{210}At reactions[6,7]

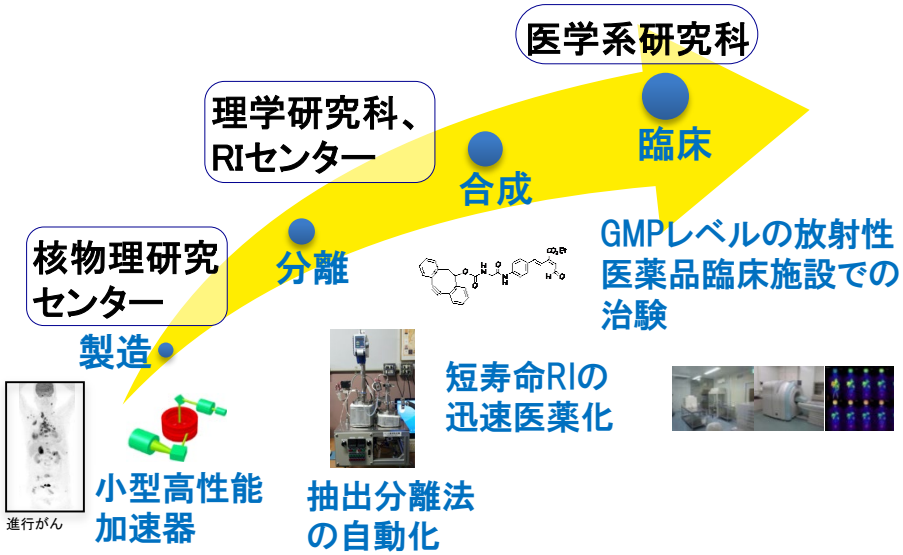
大阪大学でのα線内用療法の開発

強み

同じキャンパスの中に大型加速器施設とFirst-in-Human試験（新規医薬品を世界で初めてヒトに投与する臨床試験）が出来る臨床研究中核施設である医学部附属病院がある.

⇩

開発から臨床応用までがOne stopで

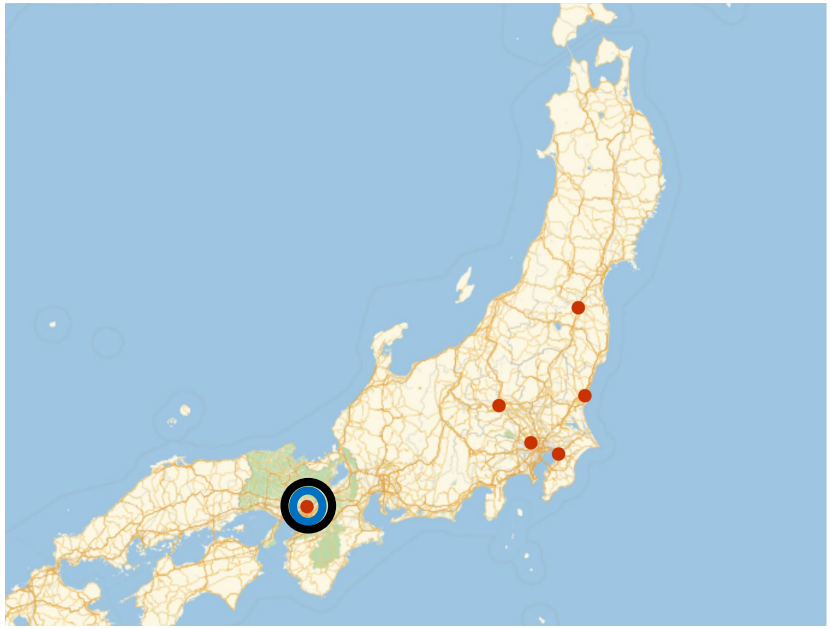


主な実績

- 核物理研究センターに^{211}At生成専用ビームラインを整備.
- 年間300時間以上のAt-211の供給（月に1～2回）.
- ^{211}Atの分離精製法の確立（特許出願中）.
- 医学系研究科で^{211}Atイオンの動物の体内動態を画像化（世界初）.
- 理学研究科が複数の薬剤候補分子の^{211}At標識化に成功.

世界と国内の動向と本プロジェクトの位置付け

- ● ^{211}Atの製造が可能
- ○ 白色中性子の照射が可能
- ○ ミューオンの利用が可能



- 北米、日本、欧州の3セクターで^{211}Atを用いたRI核医学治療薬の開発競争.
- 開発のために鍵となるのが、^{211}Atの安定供給網の整備.
- 国土の狭い日本は有利！

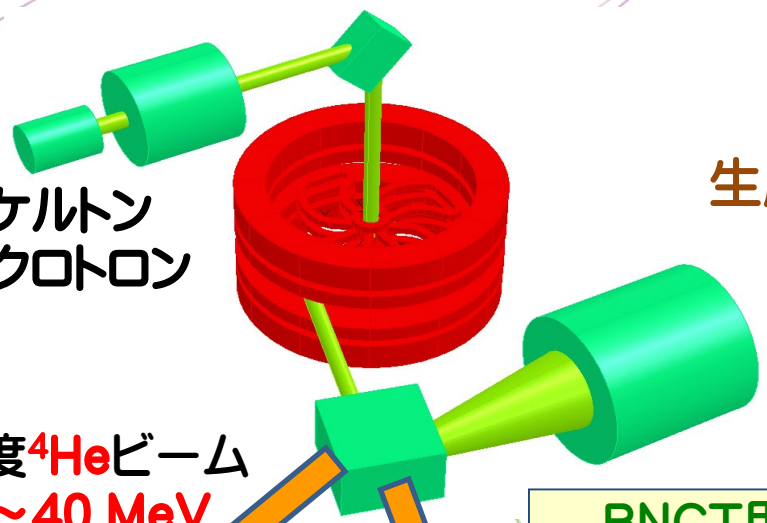
本プロジェクトでオールジャパン体制を整備して、国際競争を勝ち抜く!

- 白色中性子照射が可能な施設は世界に4ヶ所（英国のラザフォード研究所で最近、白色中性子照射場が整備された）.
- 日本では中性子施設のネットワーク(JCANS)が存在する点が強み.

大阪大学 OSAKA UNIVERSITY

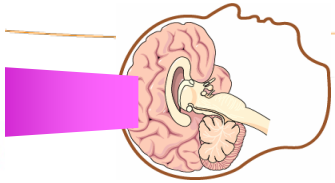
RCNP 大阪大学 核物理研究センター

高強度多機能小型加速器
- 空芯型高温超伝導スケルトン・サイクロトロン -



スケルトン
サイクロトロン

次世代熱外中性子
生成・照射システム開発



BNCT
基礎研究

大強度^{4}Heビーム
28～40 MeV

$^{209}Bi(\alpha,2n)^{211}At$

アルファ線内用療法のための
α線放出核種（At-211）
を多量生産

・国内数カ所の大量生産工場から
　の定期的な供給
・コンパクトで省電力・簡単運転に
　より病院内で24時間製造可能

BNCT用大強度熱外中性子源開発

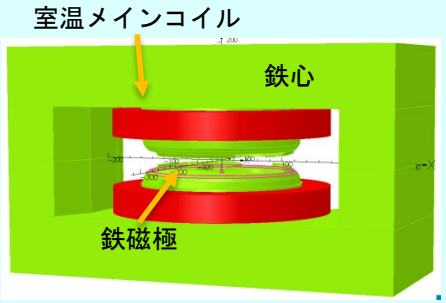
・核破砕反応利用：　proton 30 MeV
・breakup反応利用：deuteron 40MeV
・重粒子逆運動学利用：　12C2+/3+

核医学検査用RI生成

・PET（F-18, O-15, etc）：　陽子 18MeV
・SPECT（Mo-99/Tc-99m, etc.）：
　高強度陽子を使用して直接Tc-99mを生成
　※但し、高純度Mo-100が必要
　高強度中性子束を生成してMo-99を生成

AVFサイクロトロンとスケルトン・サイクロトロンの比較

従来のAVFサイクロトロン



【課題】

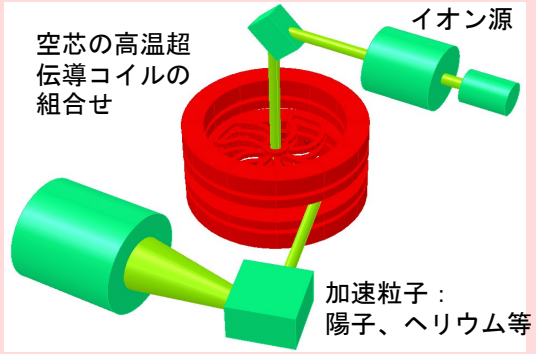
①室温コイルと鉄心の組合せ
→　大きな消費電力、低い磁場強度

②ビーム強度の安定性
→　鉄心温度の変化に敏感

③運転パラメータの再現性
→　ヒステリシスに依存

④鉄磁極の存在
→　空間的な自由度を奪う
→　ビーム強度は100μAが限界

世界初の“スケルトン・サイクロトロン”



放射性核種の製造量はビーム強度に比例

スケルトン・サイクロトロンでα線核医学治療に必要な放射性核種を多量に、安定に、安全に製造

サイクロトロン加速器技術のイノベーション

【解決策】

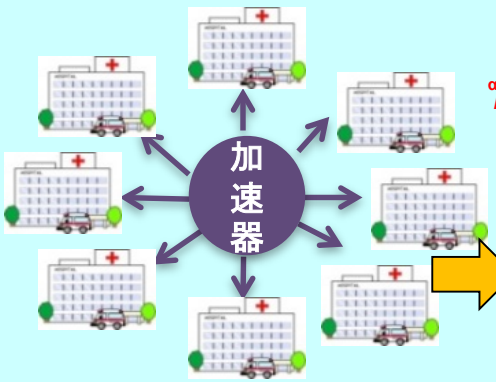
★高温超伝導コイルを採用
→　①省電力（約１０分の１）で、かつ、高磁場を発生
→　②磁場強度は室温に依らず極めて安定

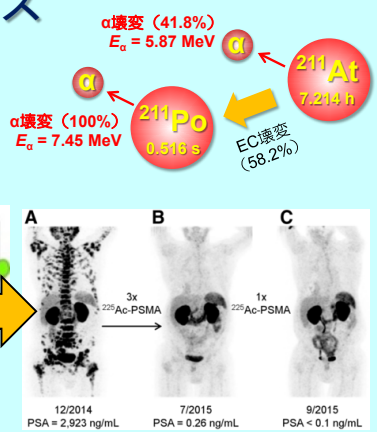
★空芯型サイクロトロン（世界初）
→　③磁場強度の再現性に優れ、運転が簡単
→　④コンパクトで省スペース、内部機器の配置が自由、従来の１０倍以上の大強度化が可能

研究開発課題1：小型加速器・照射技術の高度化

量子アプリのビジネス化を支える高強度多機能小型加速器

アルファ線核医学治療による進行がん治療ビジネス



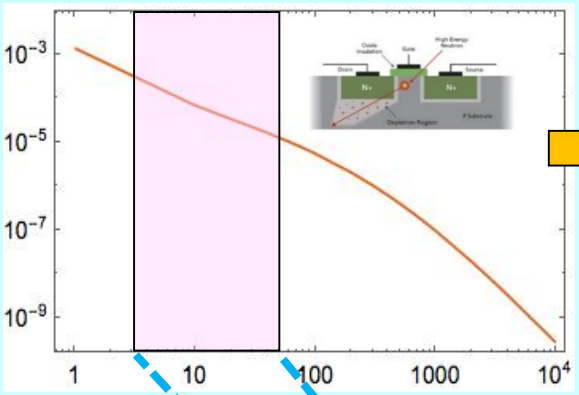


治療用RIを製造できる
多機能小型加速器の普及

安心して暮らせる
長寿社会の実現

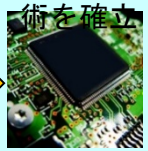
半導体デバイスのソフトエラー評価ビジネス

地上中性子エネルギー分布

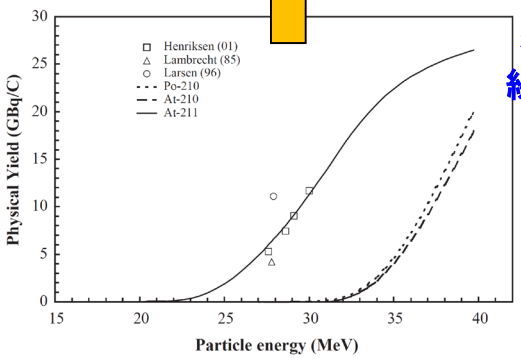


中性子のエネルギー [MeV]

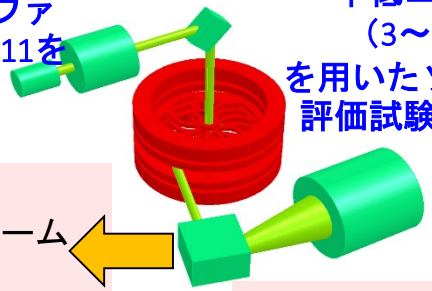
地上ソフトエラー
レート評価・校正技術を確立



安全・安心な
交通社会の実現



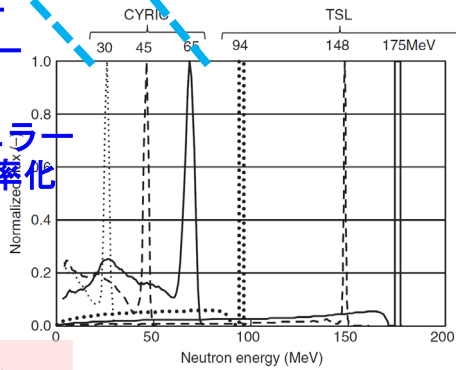
ヘリウムビーム
（28～40MeV）
を用いたアルファ
線放出核種At-211を
大量製造



高強度
ヘリウムビーム
＋
ビスマスターゲット

高強度陽子ビーム
＋リチウムターゲット

準単色中性子
中低エネルギー
（3～40MeV）
を用いたソフトエラー
評価試験を高効率化



＊競争的資金による加速器応用研究の推進

●科研費新学術領域研究（研究領域提案型）
『学術研究支援基盤形成』
「短寿命RI供給プラットフォーム」（H28～H30～H33？）

●JST産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラムOPERA
「安全・安心・スマートな長寿社会実現のための高度な量子アプリケーション技術の創出」（H29～H33）

●JST革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）
『核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化』
「加速器ベースの高強度小型冷・熱中性子源によるLLFP核種核変換処理法の研究」（H27～H30）

高レベル放射性廃棄物めぐる社会問題

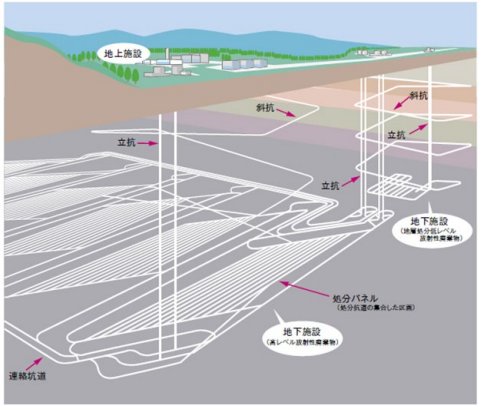
- 年間1000トン※以上の使用済み核燃料を再処理した際、
（※ 原子力発電所がフル稼働した場合）
全体の約3%の高レベル放射線廃棄物が
大量に発生する。

- 高レベル放射性廃棄物は、中間貯蔵としてガラス固化処理をし,-地下約300m以深に処分する方針

既発電分の発生本数：　約24,800本[注1]

注1：原子力発電環境整備機構　https://www.numo.or.jp/q_and_a/01/

地層処分の例

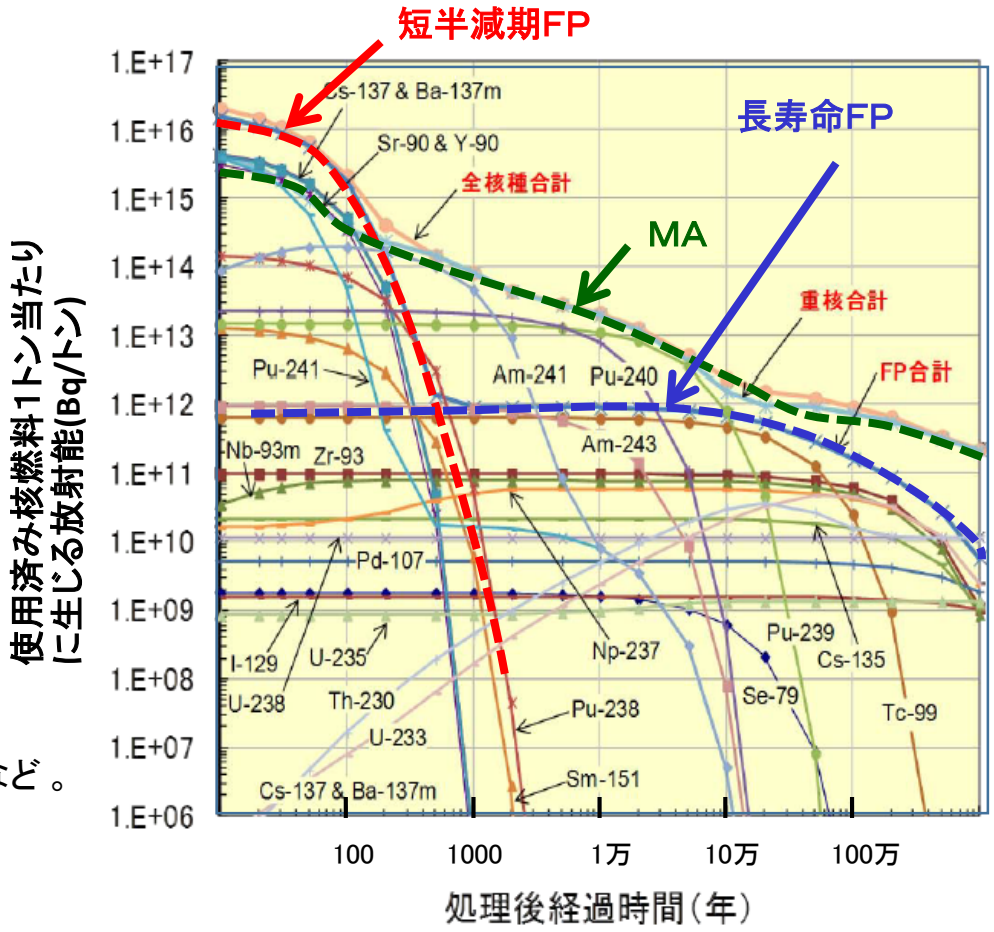


＠六ヶ所村

高レベル放射線廃棄物

- マイナーアクチニド（MA*）と
  長寿命核分裂生成物（LLFP**）の
  両者を核変換すれば
  放射能は1000年程度で大幅低減

- MAは燃料として活用できるため、
  核燃料サイクル研究として進展
  （JAEAのADS−PJ）

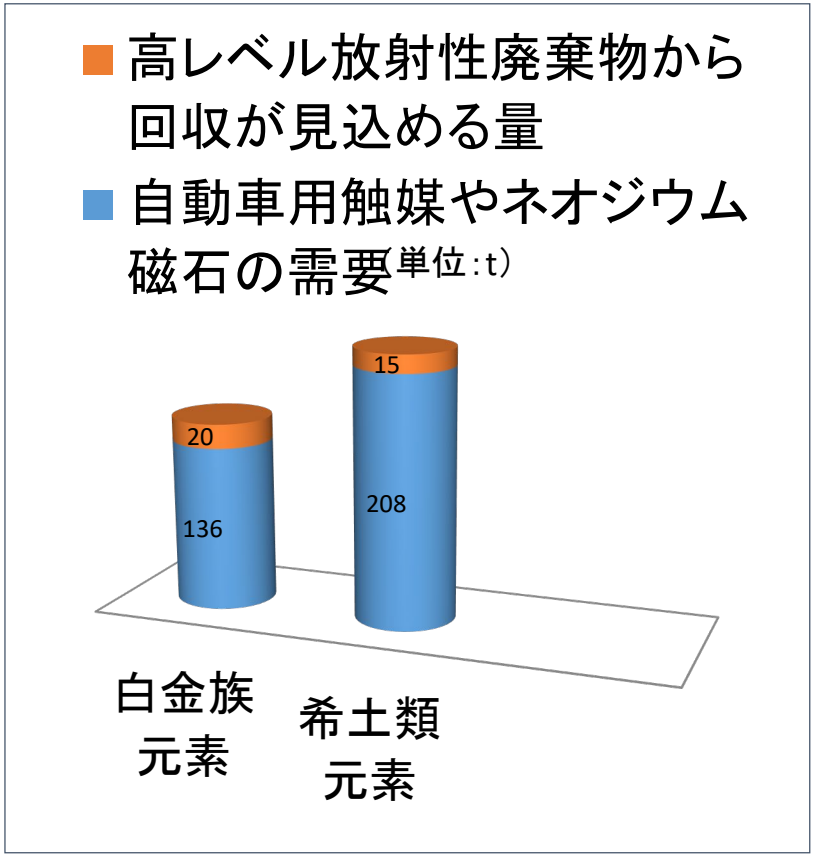


*MA：Minor Actinides, ウランが核分裂して生成する
ネプツニウム(Np),アメリシウム(Am), キュリウム(Cm)など 。

**LLFP：Long Lived Fission Products, ここでは、
半減期10万年以上の
放射性核分裂生成物7核種と定義する。

高レベル放射性廃棄物の資源化

- 高レベル放射性廃棄物に含まれるLLFPにはレアメタルなど有用元素が多く含まれる
- 有用元素の分離回収を目指すが、放射能が含まれるため、再利用が困難



LLFP核変換システム開発の目標

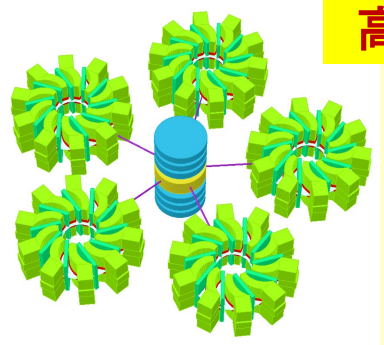
【概念検討】

高レベル放射性廃棄物

Pd-107, Cs-135, Se-79, Zr-93

LLFP分離・回収

大強度重陽子ビーム等を用いた
LLFP核種との直接反応及び
二次的に発生した中性子による核変換



高強度小型サイクロトロン群

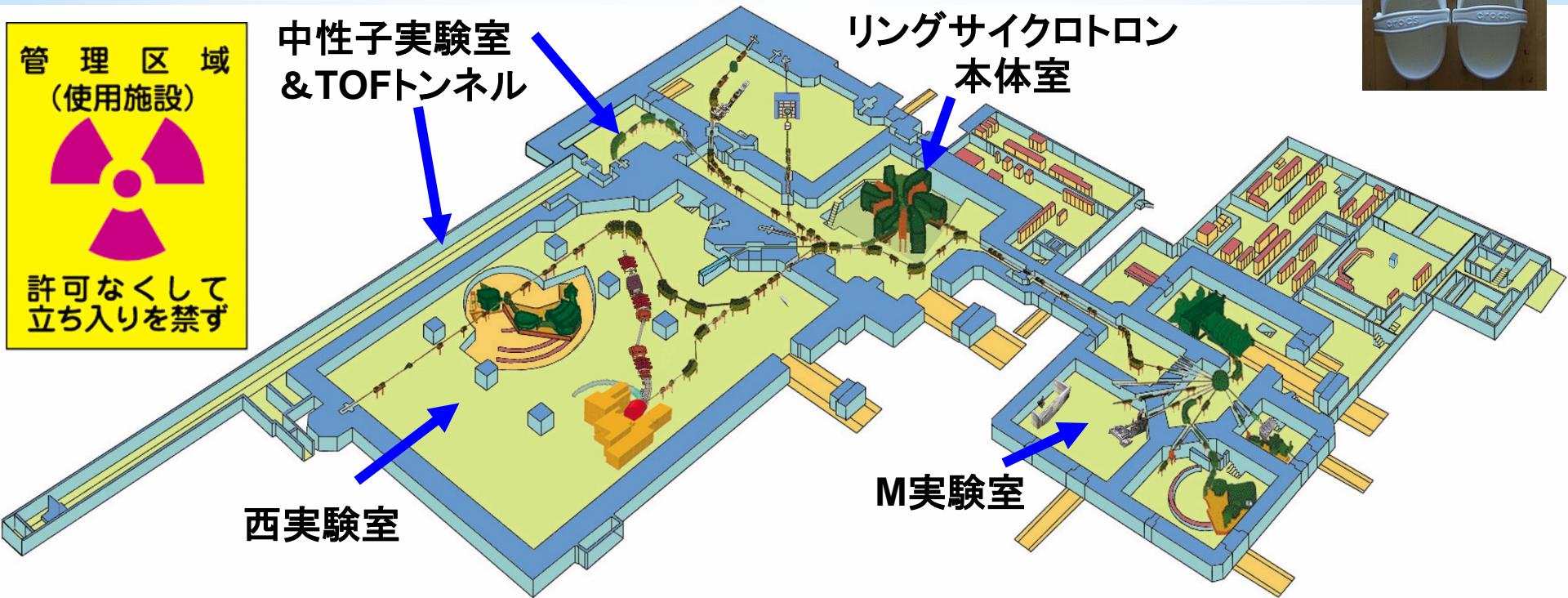
- ★重陽子の高強度化
- ★エネルギー効率の向上
- ★LLFP標的への多重照射
- ★安定性・信頼性・保守性・制御性等の向上

★有用資源への再生
★廃棄物の安定化

【比較的小型のサイクロトロンの目標性能】

- ・重陽子エネルギー　：　～100 MeV/n
- ・ビーム電流　：　～10 mA以上
- ・ビームパワー　：　～2 MW以上
- ・エネルギー効率　：　30%以上
- ・低コスト（建設、運転）

＊ 見学に当たってのお願い

足下・頭上に注意！

・施設内にはトイレはありません。
・放射線管理区域内では飲食禁止です。
　※出発前にお済ませ下さい
・荷物は全てお持ち下さい。制御室でお預かり致します。
・汚染検査室では靴の履き替えをお願い致します。