

# テーブルトップで<sup>14</sup>C年代測定 ～超小型加速器質量分析装置～

10<sup>-10</sup>以下の  
同位体比測定が可能！

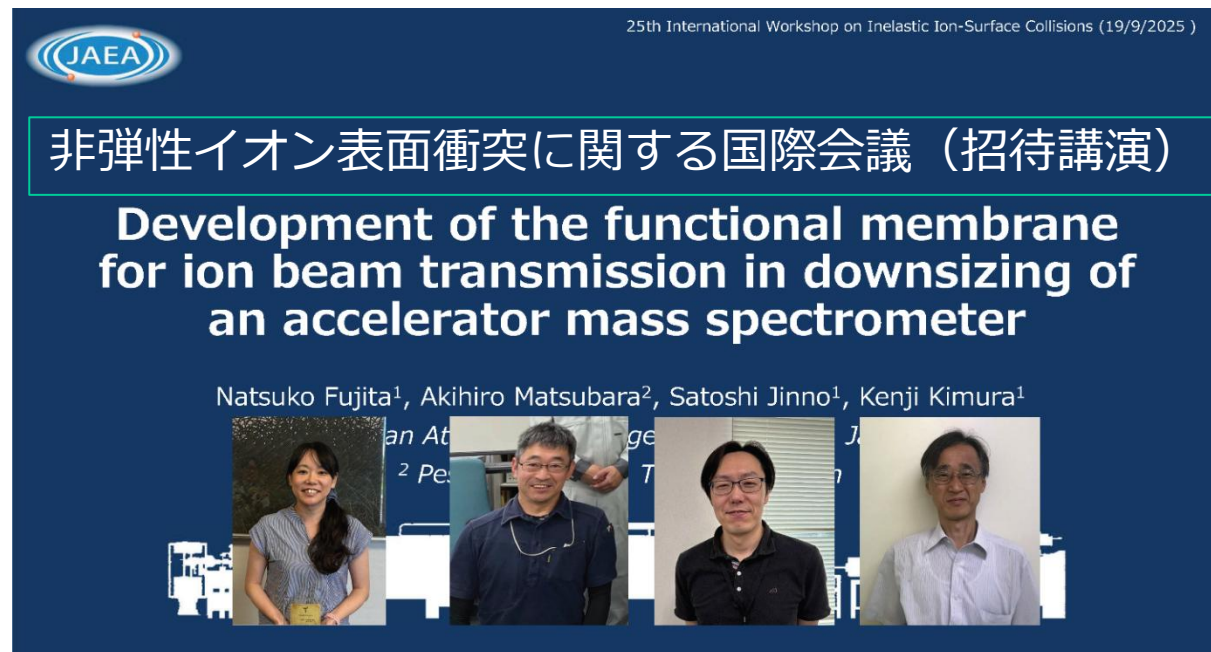
日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター

年代測定技術開発グループ 研究副主幹 藤田奈津子

# 自己紹介と開発チーム

藤田奈津子

- 専門：イオンビーム物理学
- 出身：兵庫県神戸市
- 2013年 奈良女子大学大学院において博士号（理学）を取得
- 学生時代は加速器を使ったイオンビーム分析に係る研究を、  
現職では加速器質量分析の高度化を目指した研究に携わってきた
- 本研究の一環として、応用物理学会  
第3回（2024年度）ダイバーシティ  
& インクルージョン賞（女性研究者  
研究奨励賞）を受賞



25th International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions (19/9/2025)

JAEA

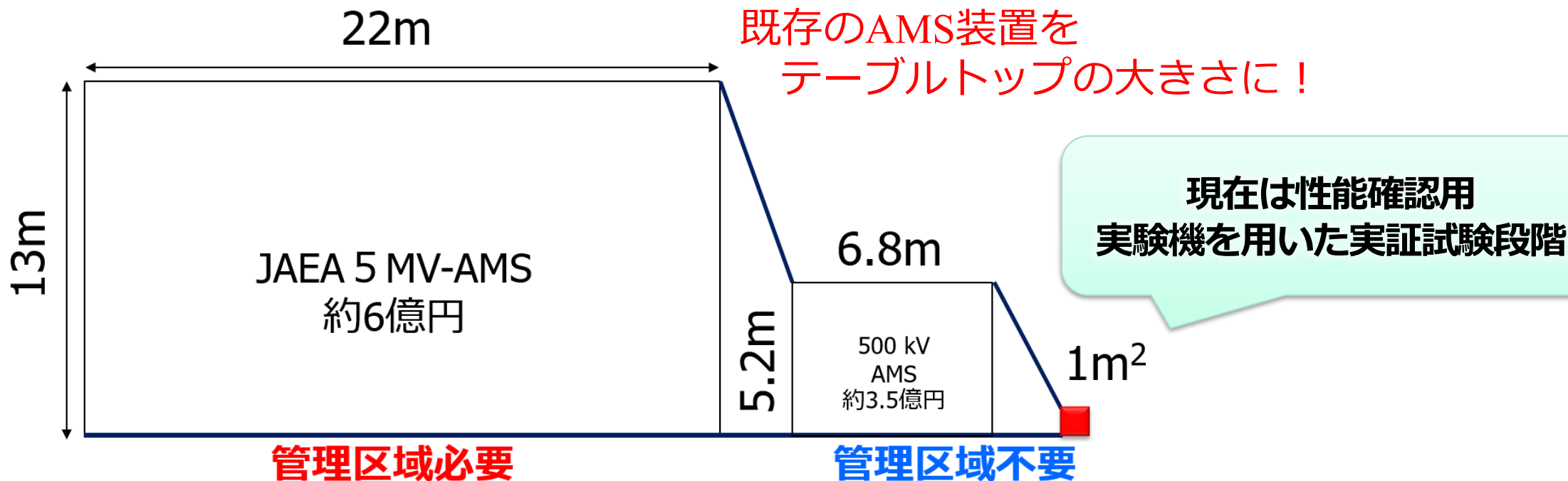
非弾性イオン表面衝突に関する国際会議（招待講演）

Development of the functional membrane  
for ion beam transmission in downsizing of  
an accelerator mass spectrometer

Natsuko Fujita<sup>1</sup>, Akihiro Matsubara<sup>2</sup>, Satoshi Jinno<sup>1</sup>, Kenji Kimura<sup>1</sup>

# 将来目標

超小型・安価・管理区域不要で前処理フリー  
炭素専用全自動AMS装置を開発し世界中に普及！



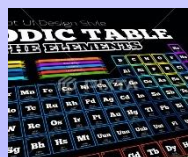
開発・製品化のパートナー募集！

# 加速器質量分析(AMS)とは

加速器質量分析 (Accelerator Mass Spectrometry, AMS)  
 ⇒ 希少放射性核種を用いた超微量分析・同位体比測定



宇宙科学



核物理学



地球科学



環境学



地質学



医学



薬学



考古学



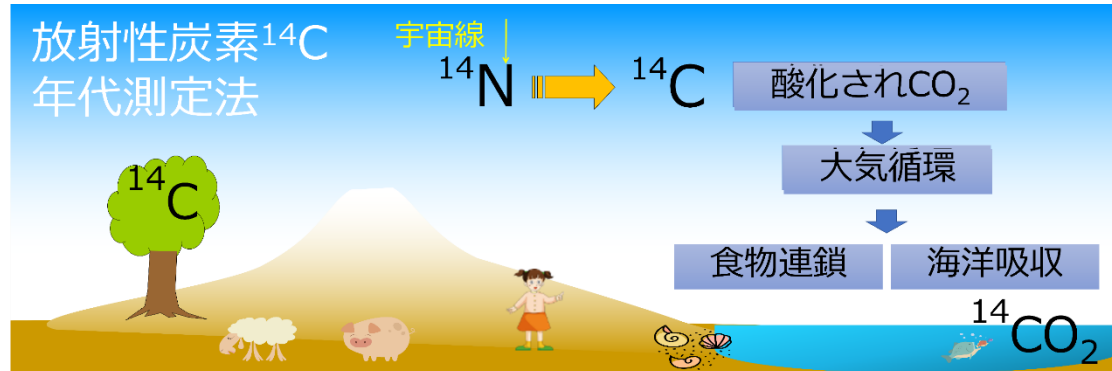
材料工学

測定核種例:  $^{10}\text{Be}$ 、 $^{14}\text{C}$ 、 $^{26}\text{Al}$ 、 $^{32}\text{Si}$ 、 $^{36}\text{Cl}$ 、 $^{41}\text{Ca}$ 、 $^{53}\text{Mn}$ 、 $^{129}\text{I}$ など

## $^{14}\text{C}$ -AMS市場の例

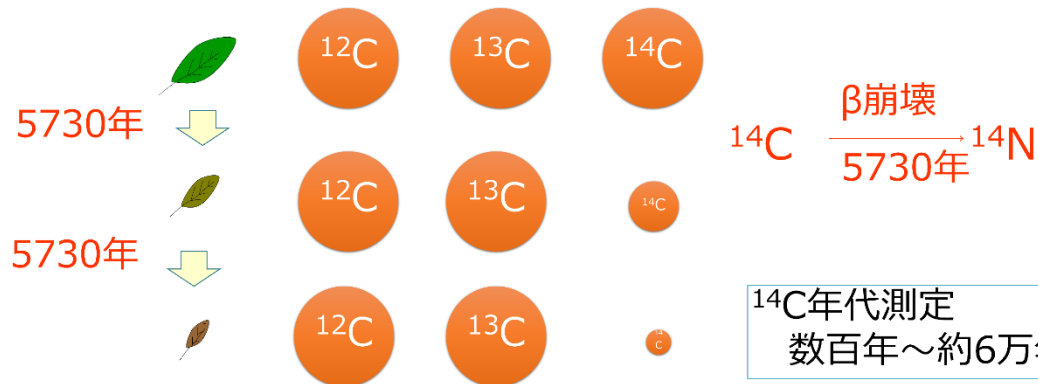
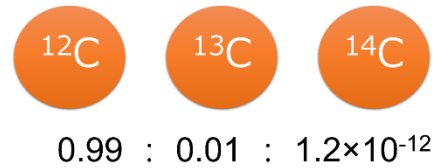
- ゴムやプラスチックなどの**材料の輸出規制に関わる値**  
(バイオベース度)の**測定**
- $^{14}\text{C}$ で標識された**新薬評価**
- 遺跡や地質調査現場などの**年代測定や同位体比分析**
- 隕石の**微粒子分析や宇宙の研究**

# 炭素14測定

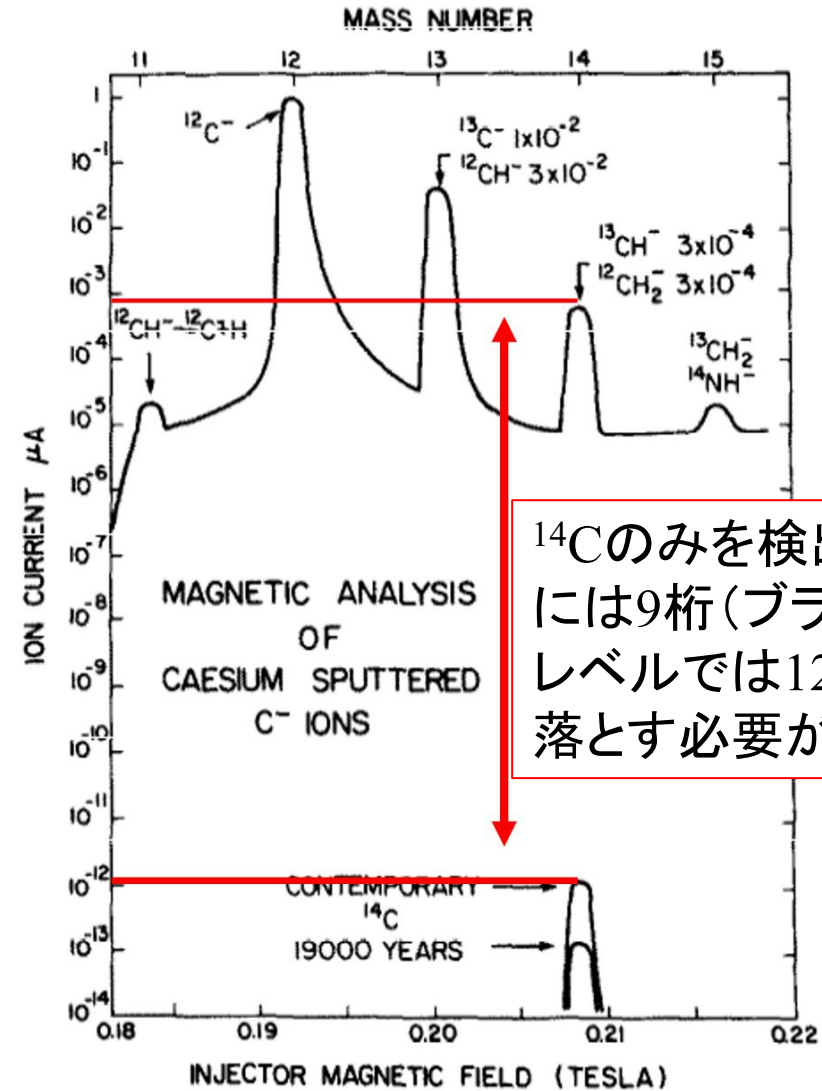


発生と消滅のバランス

同位体比が平衡 (近似的)



$^{14}\text{C}$ 年代測定  
数百年～約6万年



$^{14}\text{C}$ のみを検出するには9桁(ブランクレベルでは12桁)落とす必要がある[1]

[1] A.E. Litherland, NIMB 5(1984)100.

# 解決したい社会的課題

## AMS市場の課題

**メーカーや大学など、装置を導入したいところが多いが導入できない**

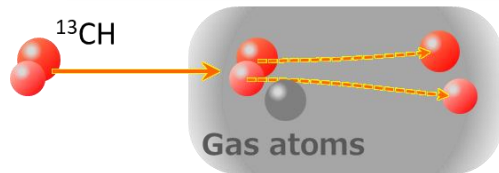
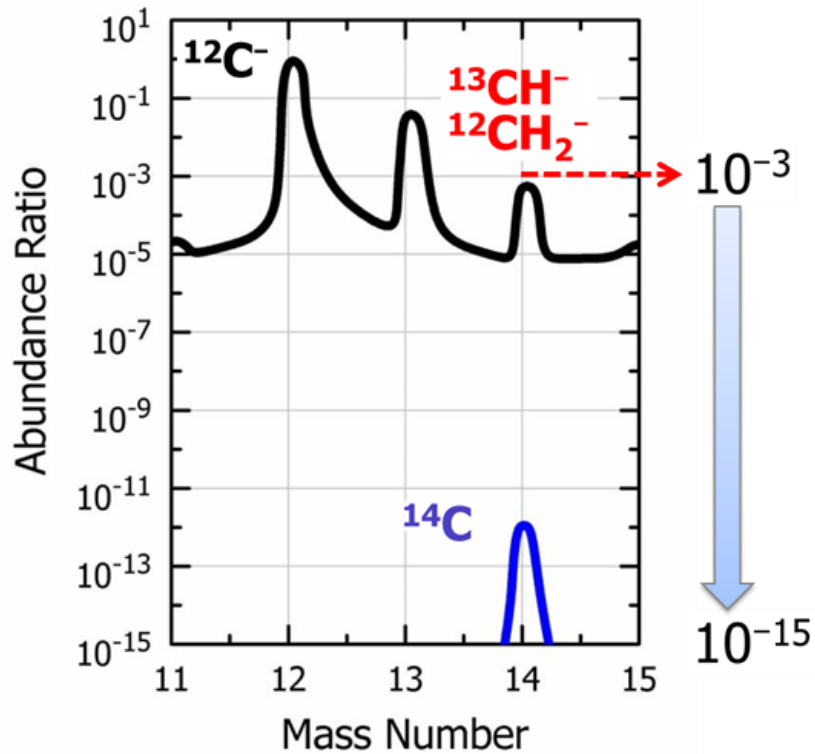
- 高コスト(装置導入・維持管理など)
- 装置設置場所に制限あり(大型・加速電圧1MV以上で放射線管理区域が必要)
- 前処理が手間
- データ取得までに時間がかかる

**⇒現在は、装置を持つ限られた施設に外注で分析**

## 製品化への課題

**装置を利用したいというニーズはあるが、既存のAMS装置は大型・高価・管理区域必要など制限が多く、装置導入に障壁があるため市場が小さい**

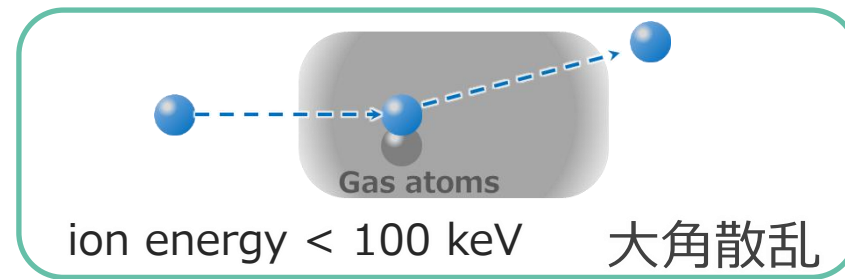
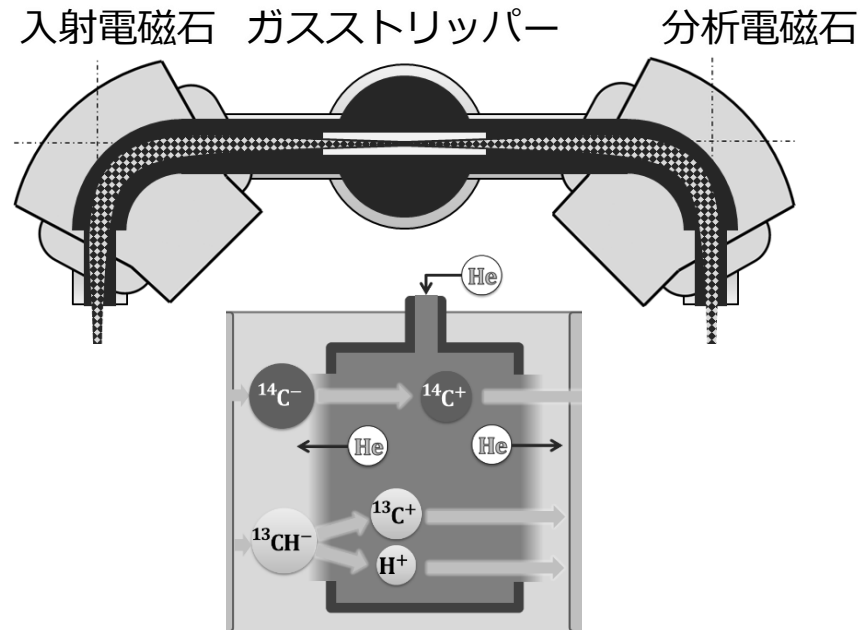
# AMS小型化への技術的課題



ガスとの衝突で  
分子解離&荷電変換

## ガスストリッパーの役割

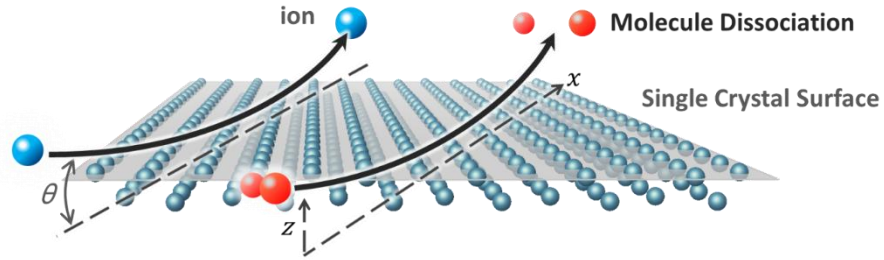
$^{14}\text{C}$ -AMSを行う際の妨害分子  
(=同質量分子;  $^{12}\text{CH}_2$ ,  $^{13}\text{CH}$ ) を解離させて $10^{-12}$ 以上下げる



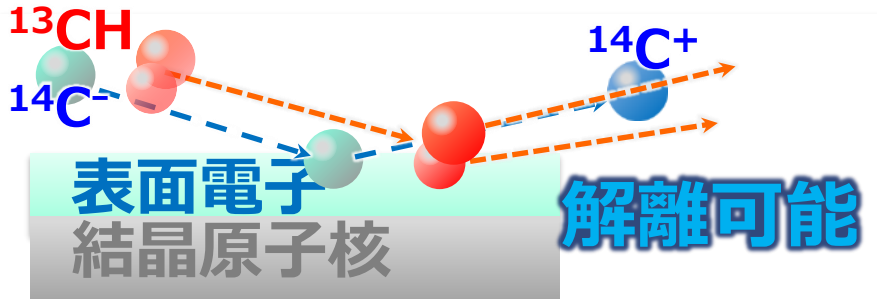
## 低エネルギー (=大角散乱) での入射

- 低い透過率
- バックグラウンドの増加

# 課題の解決策



結晶表面で鏡面反射



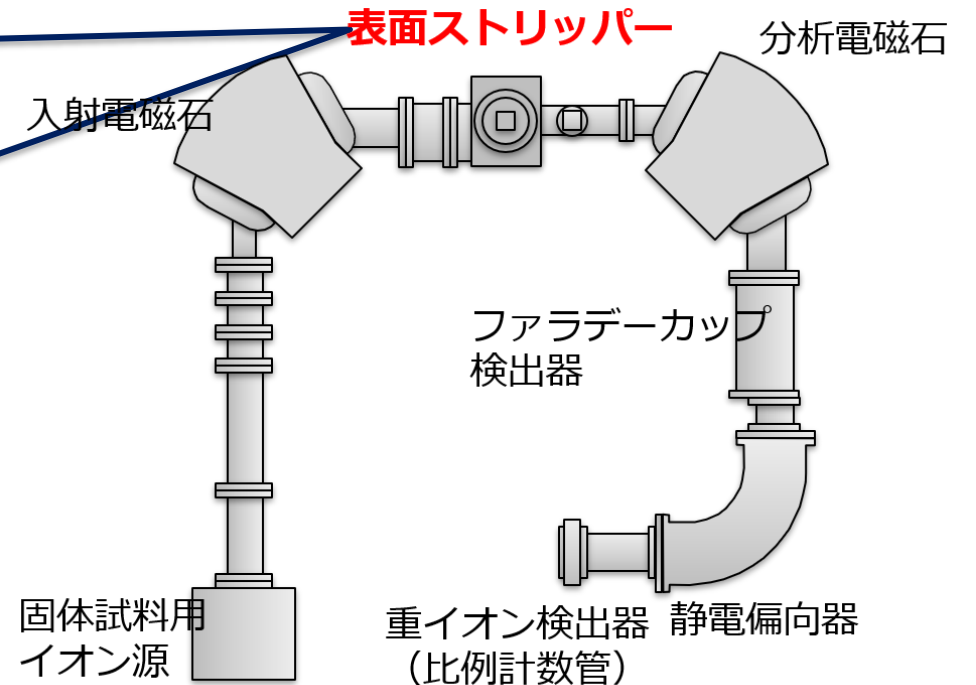
大角散乱 低減

利点：

- ✓ 高い透過率
- ✓  $^{13}\text{C}$ CH分別可能
- ✓ ガス不要
- ⇒ 小型化可能

課題解決のコア技術

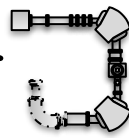
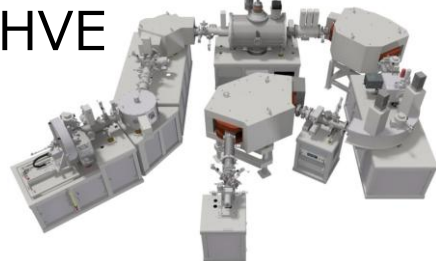
「イオンビーム機能性透過膜」；特許第6569048号  
 FUNCTIONAL MEMBRANE...; PCT ; WO2018173812.



# 東濃地科学センターのAMS

## JAEA-AMS- TONO-300kV

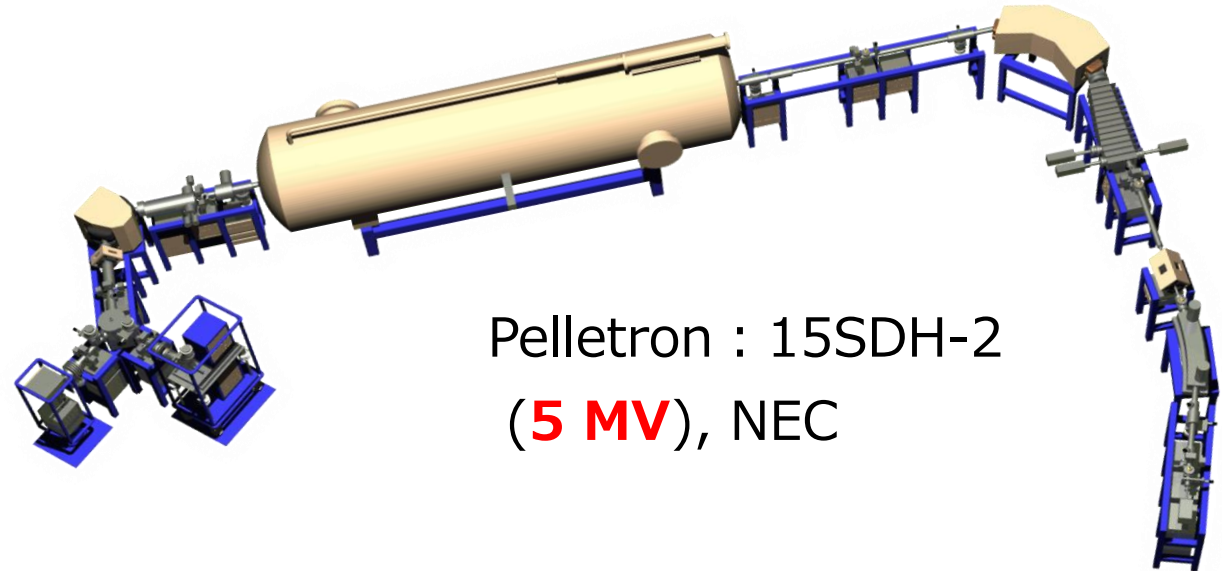
4103Bo-AMS  
(**300 kV**),  
HVE



超小型  
AMS  
(**40 kV**),  
JAEA  
(開発中)

オペレー  
ション  
ルーム

## JAEA-AMS-TONO-5MV



Pelletron : 15SDH-2  
(**5 MV**), NEC

放射線管理区域

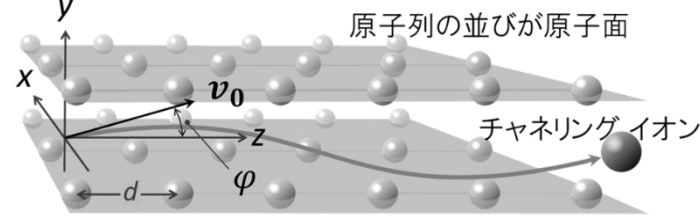
1m

# イオンビーム機能性透過膜発案のきっかけ

JAEA萌芽研究開発制度において基盤整備 (2015-2016)

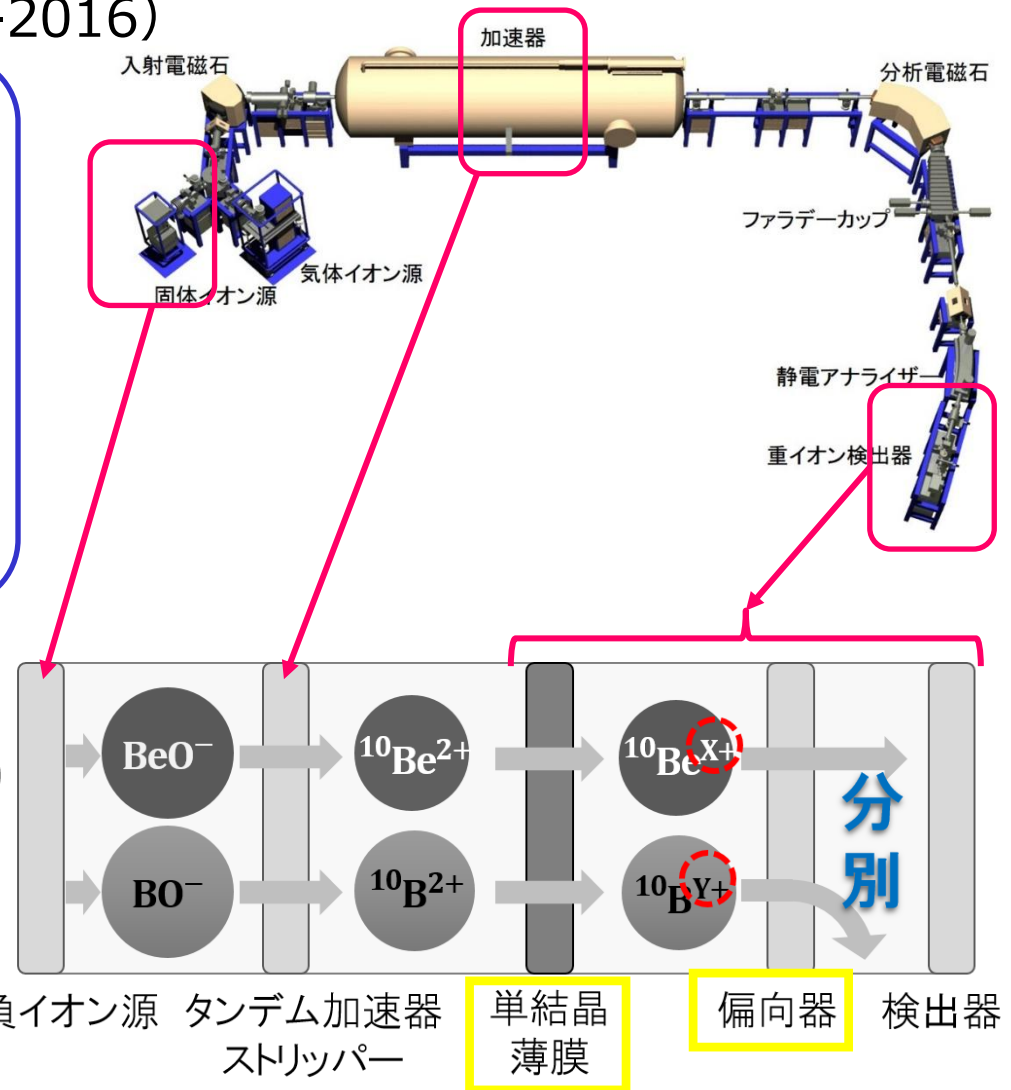
## コヒーレント共鳴励起 (Resonance Coherent Excitation : RCE)

運動するイオンが静的周期場を感受し  
イオンの内部励起が発生する現象



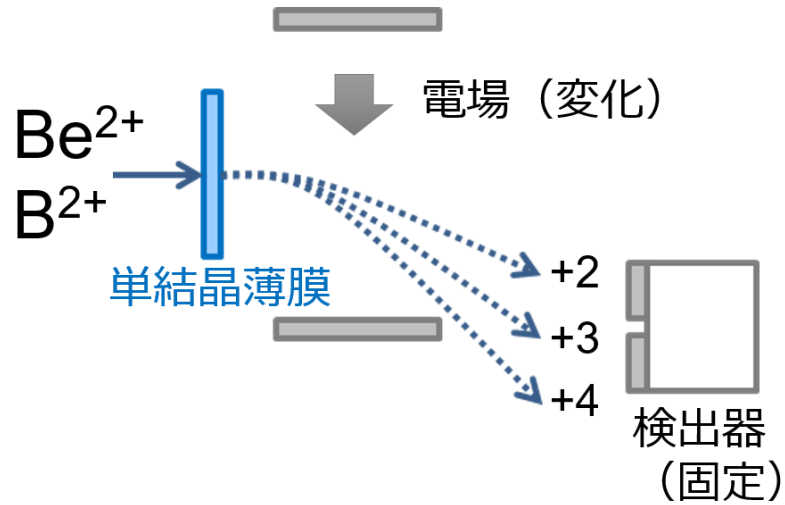
特許  
第6086587  
(原子力機構)

目的核種  
ベリリウム-10  
妨害核種  
ホウ素-10



RCEを発生 → 電荷の違いで分別

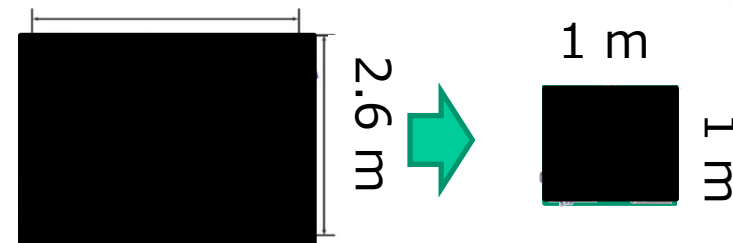
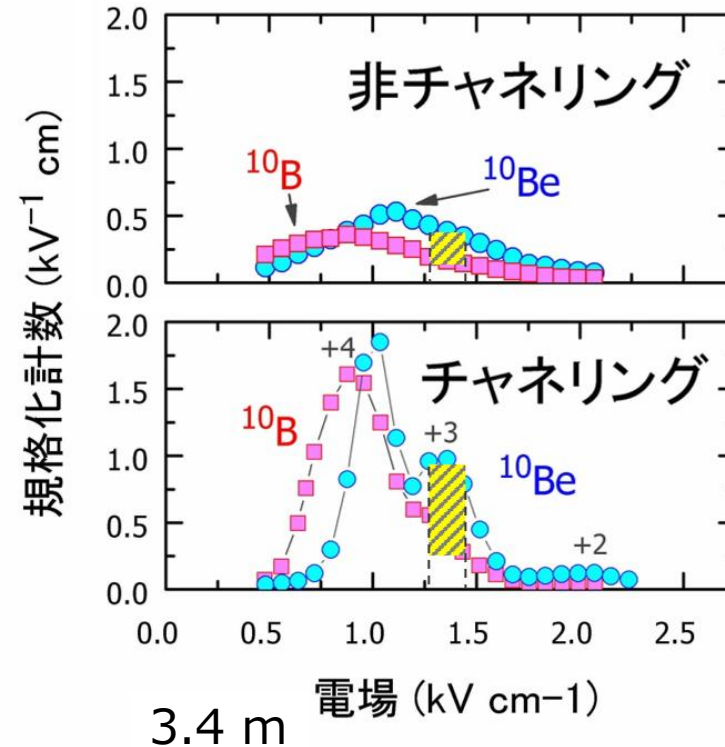
# 技術基盤の整備（萌芽研究報告会スライド改変）



**「チャネリング状態は  
分別能力が高い」  
ことを世界に先駆けて実証**

H29年3月 国内特許出願  
H29年8月 国際会議発表  
H29年9月～外国出願

及び論文投稿準備中

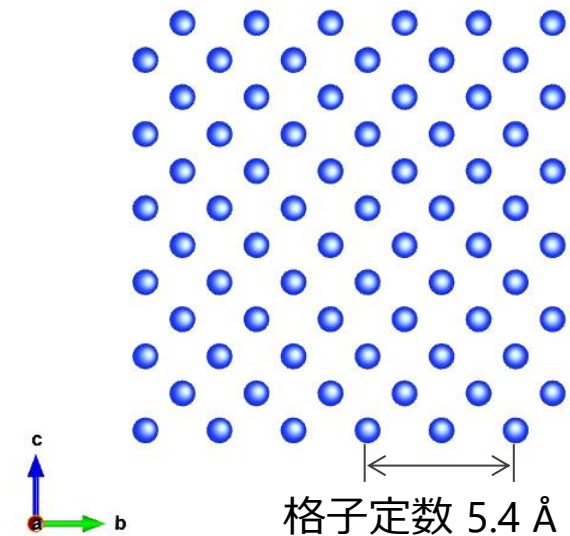
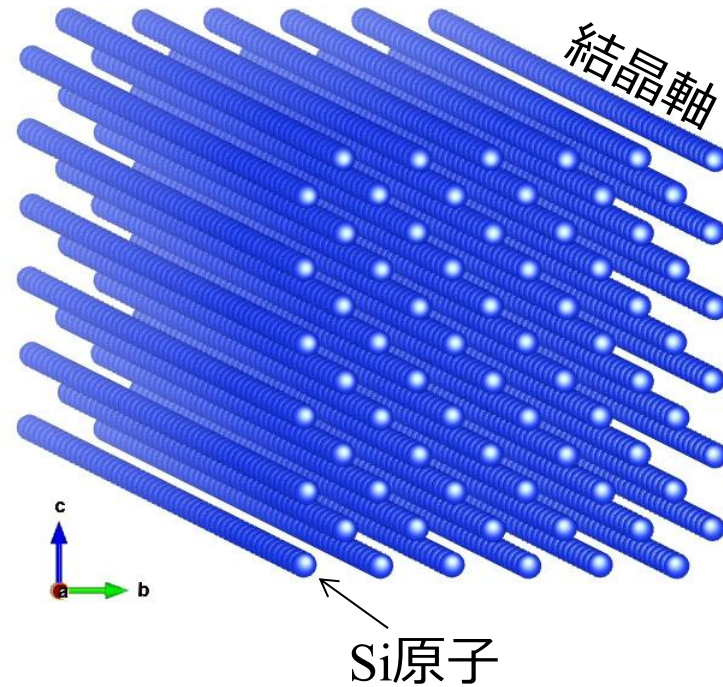


AMSに本技術を使用することで  
1mx1m級の世界最小AMSに！

# 結晶のチャネル

ケイ素(Si)単結晶薄膜  
(厚さ約30nm)

結晶軸から見ると空隙（チャネル）が見える



結晶軸から見た原子配置  
(100) 面

# チャネリングの応用

## ➤ イオンビーム分析

- ラザフォード後方散乱
  - ・ 格子欠陥, 表面状態, 注入イオンの特定

## ➤ GeV~TeVイオンの偏向

- チャネリング透過

## ➤ 原子分子・放射線物理の研究手段

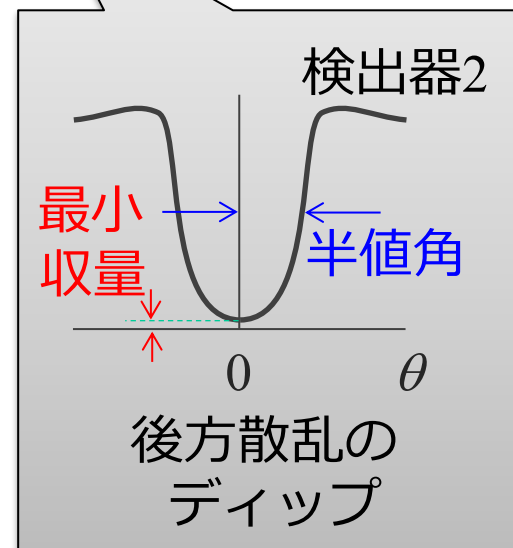
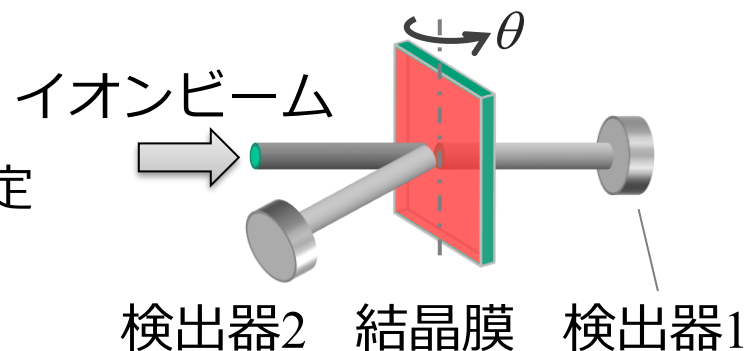
- 高密度電子, 多価イオン分光

## ➤ 原子核の寿命の測定

- ブロッキング・ドップラーシフト法等

文献:

- ・ 藤本・小牧, イオンビーム工学 (内田老鶴圃, 1995) .
- ・ Cohen et al., Nucl. Instr. Meth. B225 (2004) 40.



# AMSにおける同重体分別

AMS核種	同重体 (妨害核種)
$^{10}\text{Be}$	$^{10}\text{B}$
$^{26}\text{Al}$	入射イオン AIO <sup>-</sup> の場合 $^{26}\text{Mg}$
$^{32}\text{Si}$	$^{32}\text{S}$
$^{36}\text{Cl}$	$^{36}\text{S}$
$^{41}\text{Ca}$	$^{41}\text{K}$

試料の前処理では  
除去が困難

安定核種を1としたとき

AMS核種  
ppt  $10^{-12}$  未満

同重体  
~ppm  $10^{-6}$

同重体は数桁 高い

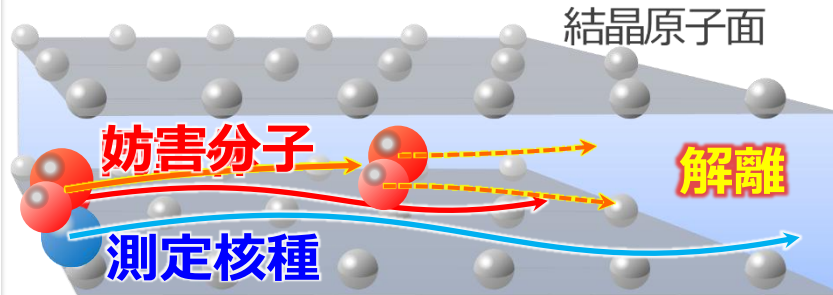
# 着目した特性

**核的**  
相互作用は小さい  
ランダム条件の数%



- 大角散乱の抑制  
⇒ 損失低減

イオンチャネリング



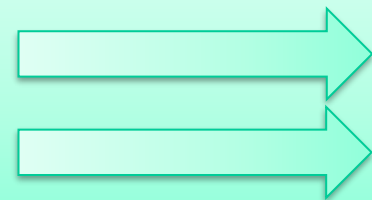
**電子的**  
相互作用は十分  
ランダム条件の約半分



- 阻止能は十分  
⇒ 同重体とのエネルギー差
- 電子脱離は可能  
⇒ 妨害分子を解離

ビーム損失を低減しつつ、

- 同重体とのエネルギー差
- 妨害分子の解離



ディグレーダー

ストリッパー

# AMSへの応用を提案

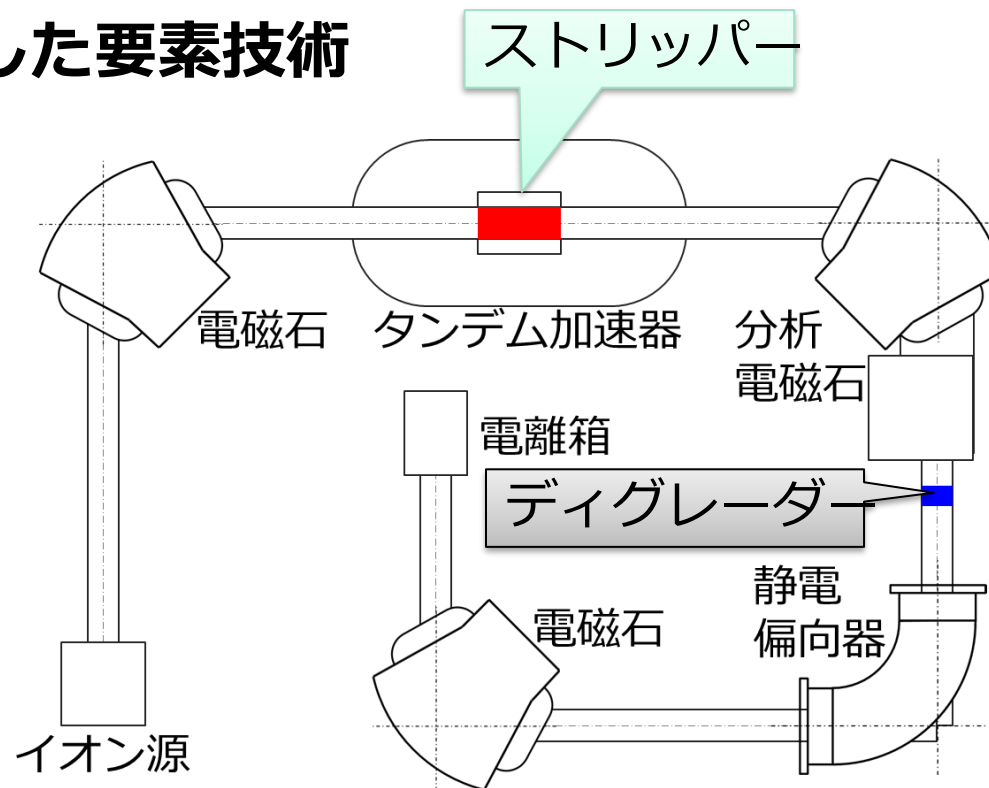
## イオンー物質相互作用を利用した要素技術

- ディグレーダー  
“同重体分別”

➤ **ストリッパー**  
“同質量分子の解離”

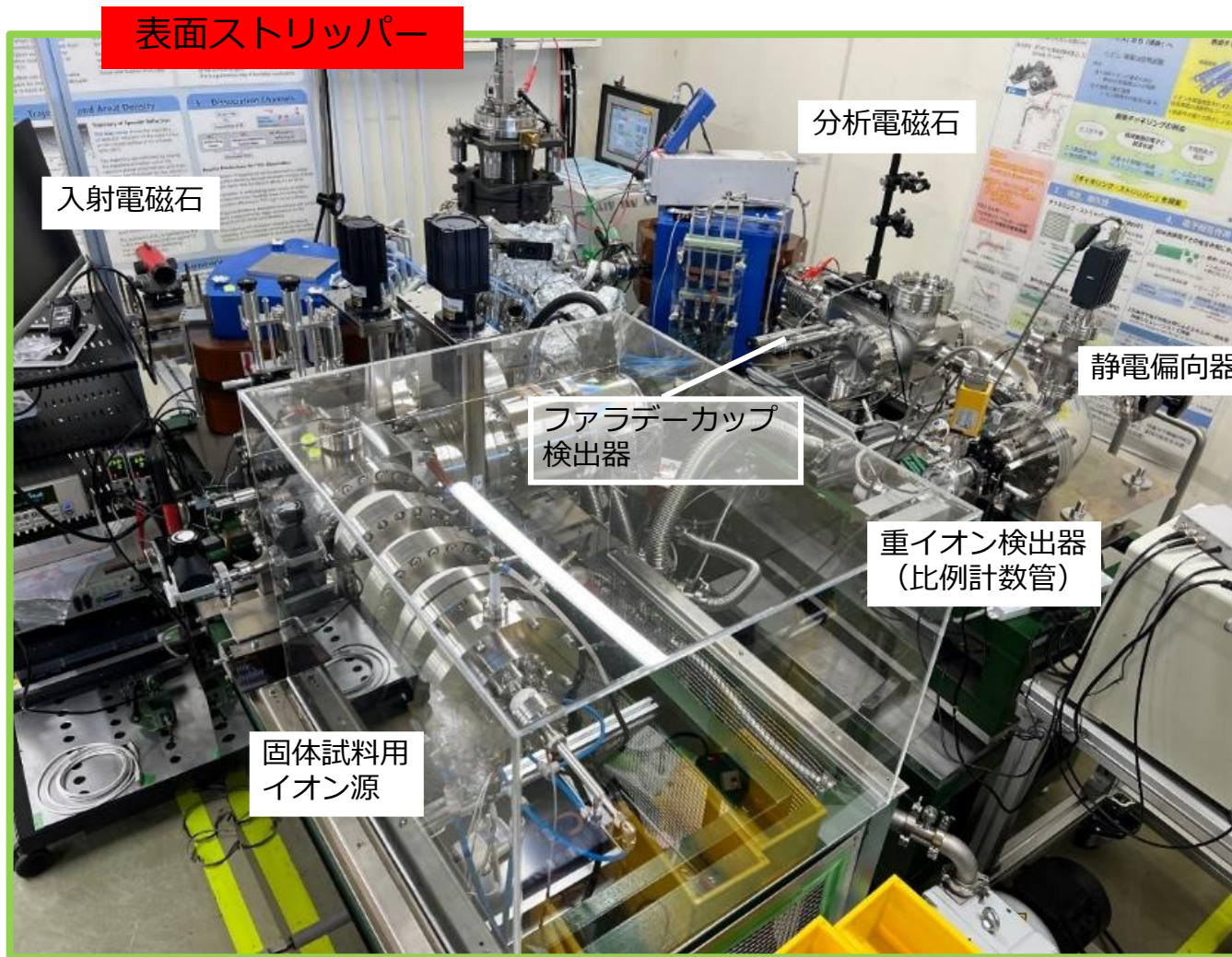
妨害粒子の除去機能

チャネリングを応用？



小型AMS装置の模式図

# 開発中の超小型AMS



2024/11/15 16:33

新しい加速器質量分析技術の開発に成功 ～超小型化により学術・産業分野での利用を加速し、カーボンニュートラルの実...



令和6年11月15日

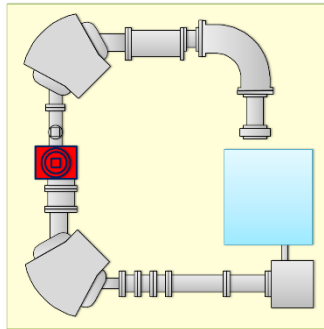
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

新しい加速器質量分析技術の開発に成功  
～超小型化により学術・産業分野での利用を加速し、カーボンニュートラルの実現に貢献～

- ❑ 最大加速電圧：40 kV
- ❑ 測定予定核種： $^{14}\text{C}$
- ❑ 大きさ：1.9 m × 1.9 m
- ❑ イオン源：Cs sputter
- ❑ 入射方式：m/q固定
- ❑ 表面ストリッパーで正在使用している単結晶：塩化カリウム
- ❑ 結晶表面への斜入射角：2 – 3 deg.
- ❑ 表面ストリッパーでの真空度： $1 \times 10^{-7}$  Pa

# 市場規模

当装置導入で**自ら測定可能!**



新開発炭素専用  
**AMS装置を**  
数千万円で提供

- 大量分析可能
- 導入・維持管理コストの低減
- 設置場所の制限が緩和

=

類似装置：ICP-MS  
価格：3千万～8千万円

- 国内では、各都道府県に数台～
- 地方国立大学にも普及

現在  
年間世界  
生産量  
約10台

年間世界生産量  
約**500台**  
年間市場規模  
数百億円

導入先

産業界



ゴム・プラスチック等材料・製薬メーカー

各国の国立博物館

研究所

地方大学



スミソニアン博物館

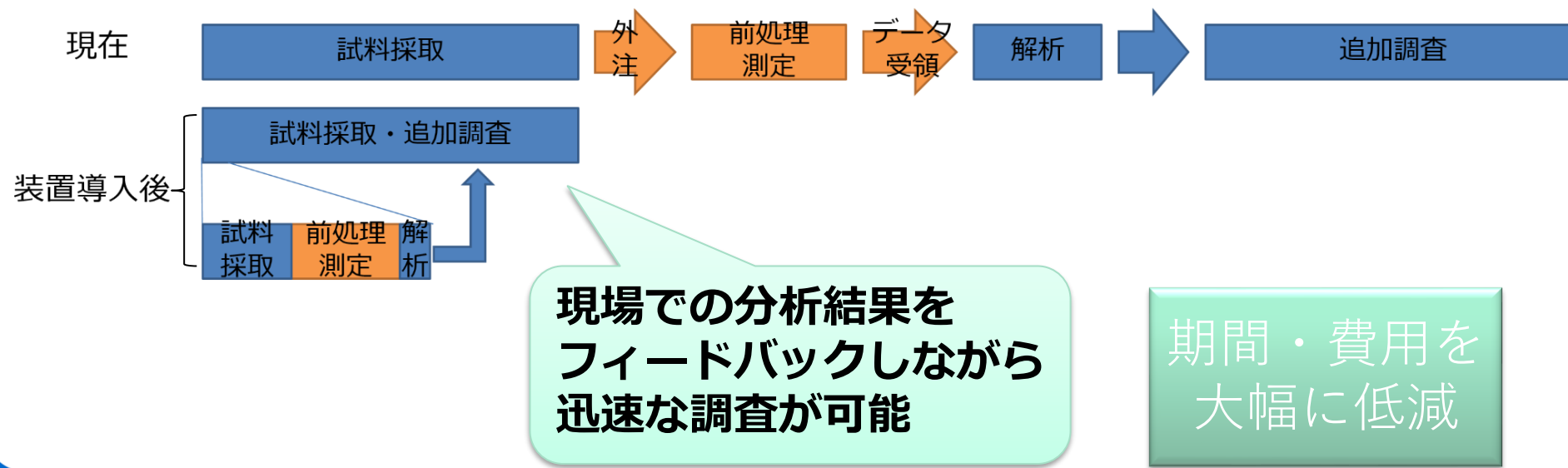
NASA

奈良女子大学

# AMS小型化による市場例 1

**遺跡や地質調査現場、現場サイトなど、  
従来不可能だった現場での装置設置・分析**

$^{14}\text{C}$ 年代測定及び環境中の $^{14}\text{C}$ 濃度分析や  
宇宙線変動探索のための年輪中の $^{14}\text{C}$ 濃度分析



# AMS小型化による市場例 2

**タイヤ・プラスチック・ゴムなど  
輸出の際、製品のバイオベース度の測定が必要**

\*バイオベース度：バイオマスと石油の混合比率  
⇒環境負荷の低減や石油資源の消費量削減が目的  
**ISOの標準測定法：AMS**



タイヤ



プラスチック

外注  
納期：数週間～2か月程度  
1試料当たり6.5万円

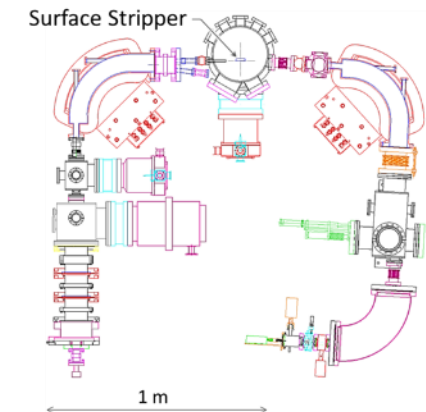
当装置導入で  
1週間に短縮！



輸出規制に関わるバイオベース度を簡単に測定可能

# 他の小型化技術

機関	チューリッヒ工科大学	スコットランド大学	JAEA
製造・販売	スイスIonPlus社	米National Electrostatics Corp.社	未定
装置名	Low Energy AMS: LEA	Positive Ion Mass Spectrometry: PIMS	未定
加速電圧	IS: 50 kV, Terminal: 100 kV	100 kV	想定 25~40 kV
開発段階	今後 実用試験	実用化	今後 原理実証
装置の特徴	負イオン→タンデム加速器	正イオン→反応ガスセル→負イオン	ガスフリー表面ストリッパー
優位点	ビーム低損失で高効率	ECRイオン源でセシウムフリー	小型化が容易
課題	ガスストリッパーから	反応ガス(イソブタン)セルから	今後検証： 荷電変換効率 耐久性・安定性 課題： 損失低減@ストリッパー
	散乱角の大きさ、漏れガスとの衝突により効率と検出限界が制限		

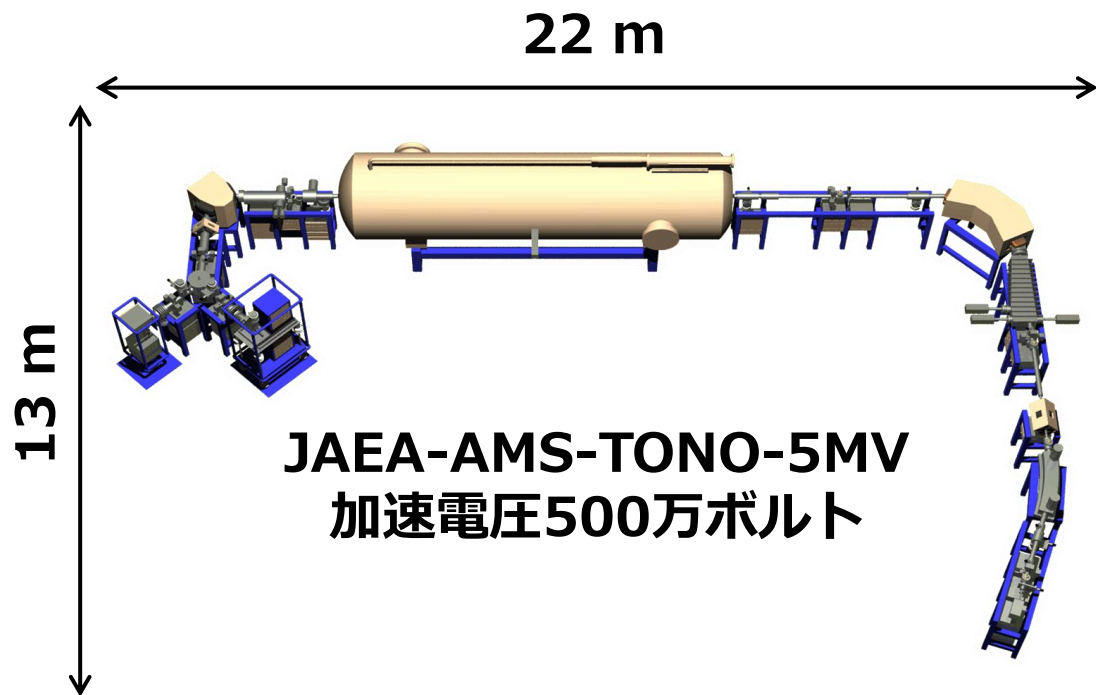


# 開発状況・実用化に向けた課題

## 表面ストリッパー＝固体単結晶の材料模索中

- ✓塩化カリウム（結晶のへき開が容易，原子的に平坦）  
イオンのエネルギー損失や荷電状態の割合の計測  
→入射するビームのエネルギーの増加に伴い陽イオンの生成率が向上することが確認されたが絶縁体のためチャージアップしてしまう・・・
- ✓テルル化スズ（塩化カリウムに蒸着して使用）
- 今後さらにAMSに適した結晶表面の探索を進める

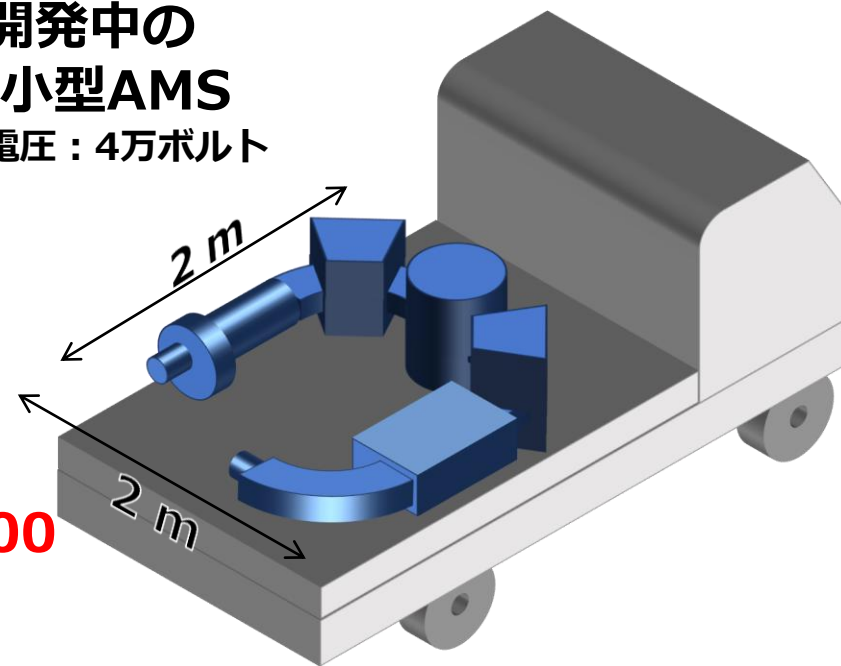
# 実現したい世界・ビジョン



放射線管理区域：必要

開発中の  
超小型AMS  
加速電圧：4万ボルト

サイズ：1/50  
加速電圧：1/100



放射線管理区域：不要

トラックで運搬可能

調査現場での「その場測定」の実現へ！

# まとめ

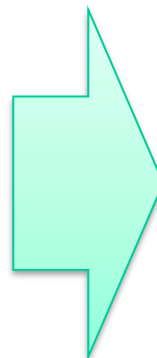
## JAEA

- ・イオンビーム機能性透過膜
- ・小型化装置製作の知識
- ・前処理フリー装置の知識



## ビジネスパートナー

- ・製品化の経験
- ・分析装置の知識  
(イオン源・検出器など部品  
オペレーションシステム  
オートサンプラー…)



開発・製品化のパートナー募集！

# 知的財産権とお問い合わせ先

## □ 本技術に関する知的財産権

- 特許6569048
- 発明の名称；イオンビーム機能性透過膜、イオンビーム機能性透過膜を用いたビームライン機器、イオンビーム機能性透過膜を用いたフィルター機器、フィルター機器の調整方法
- 特許権者；国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、株式会社ペスコ
- PCT番号 WO2018173812  
アメリカ 登録；US11051390 （オランダ、スイス 出願中）

## □ お問い合わせ先

日本原子力研究開発機構 研究開発推進部  
e-mail : seika.riyou@jaea.go.jp