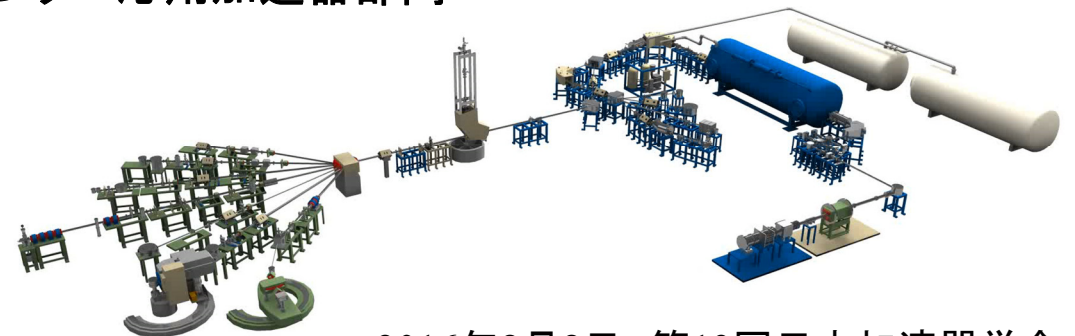

複合イオンビーム利用研究の展開を目指した 6 MVタンデム型静電加速器の開発

Development of the 6 MV Tandem Electrostatic Accelerator for New Prospects of Multiple Ion Beam Applications

笹 公和^{1,*}, Stodola Mark² and Sundquist Mark²

¹ 筑波大学 数理物質系物理学域・研究基盤総合センター応用加速器部門
UTTAC, University of Tsukuba

² National Electrostatics Corp., USA



2016年8月8日 第13回日本加速器学会
幕張メッセ

Outline

1. Introduction

- 6MVタンデム加速器導入の経緯

2. 筑波大学6 MVタンデム加速器の設計と開発

- 6 MV タンデム加速器の設計
- 加速器システムの構成
- 加速器設置作業

3. イオンビーム利用研究の展望

- イオンビーム利用研究

原子核物理・AMS・宇宙用素子照射試験装置・物質分析

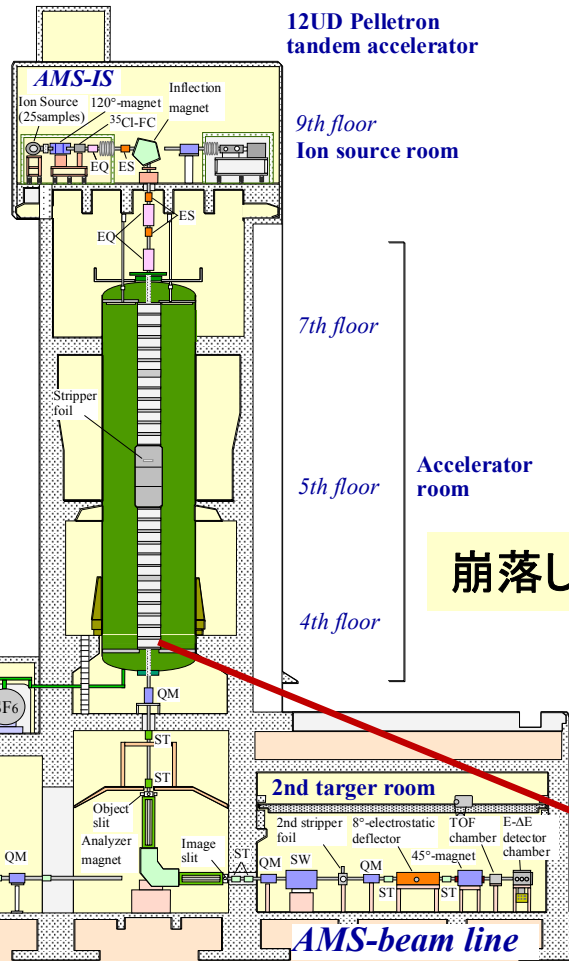
4. Summary



筑波大学 12UDタンデム加速器の損壊 (2011年3月11日)

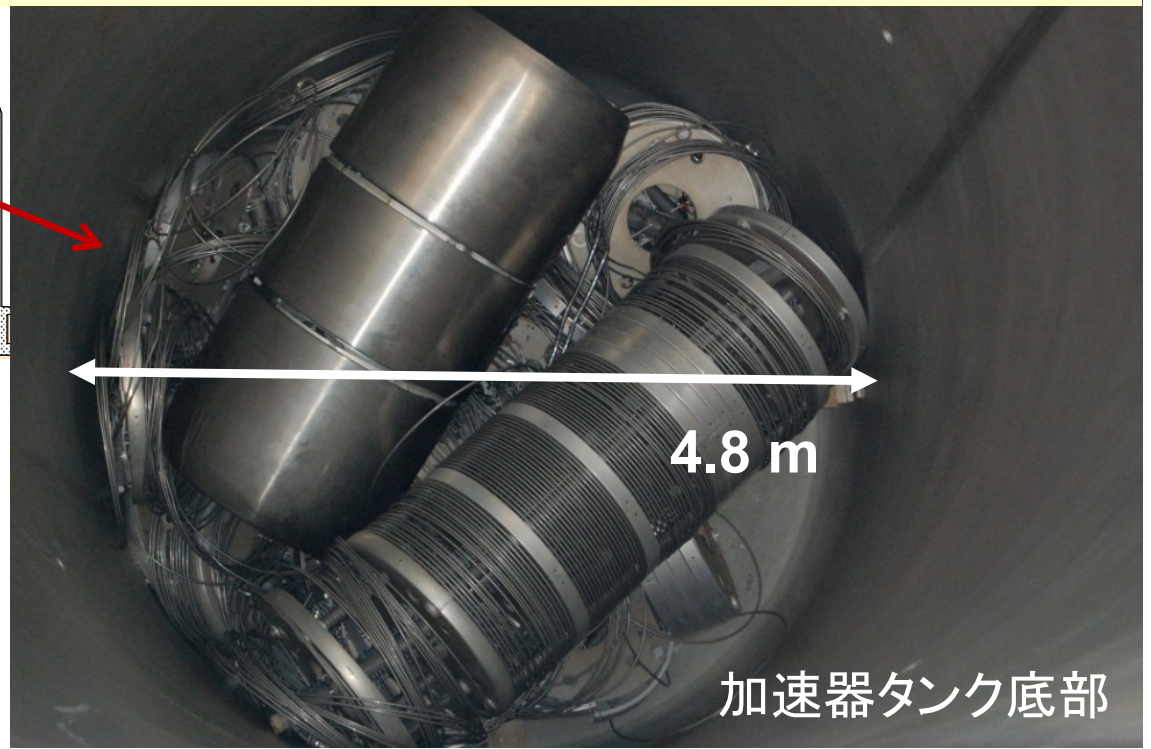


12UD at Tsukuba University



University of Tsukuba, Japan (1975)
 MODEL: Vertical Tandem Van de Graaff
 Terminal voltage range: 2.0 - 12.0 MV
 Insulation Gas: SF₆ pressure: 0.6 MPa
 Accelerator Tank: Height: 17.9 m
 Diameter: 4.8 m
 Volume: 350 m³
 Total weight: 120 ton
 Analyzing Magnet: ME/Z²=200 amu MeV

崩落した加速管コラム(長さ17.5 m, 直径1.8 m, 総重量10 ton)



2012年1月放射線発生装置の登録を解除 (シャットダウン)

筑波大学加速器施設 震災復興プロジェクト

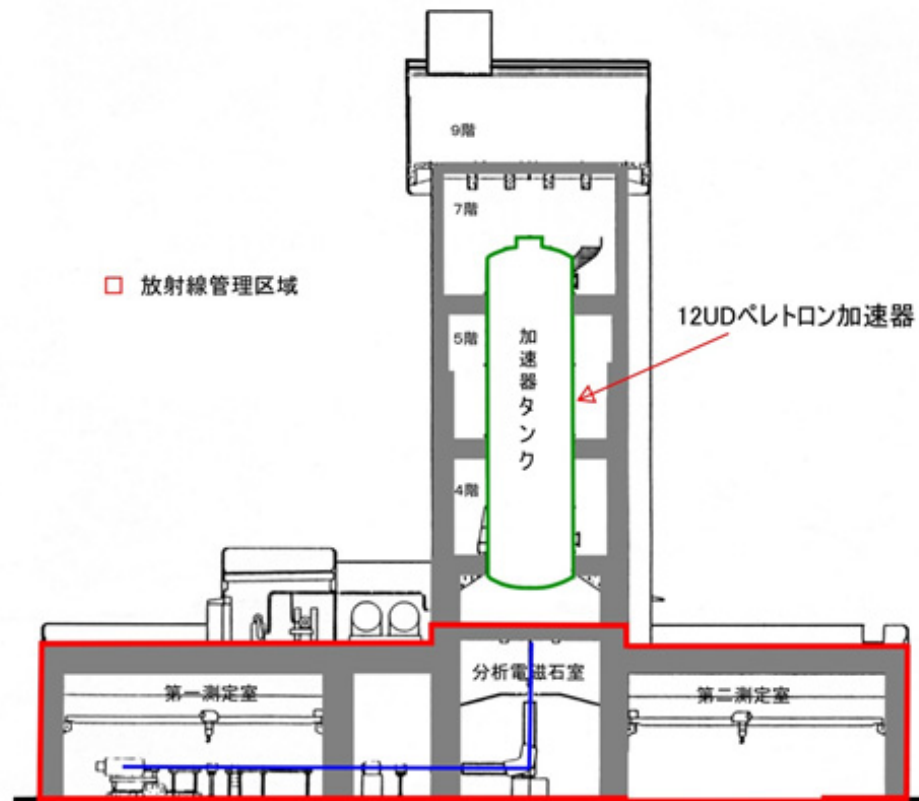
System design concept

1. 12UDタンデム加速器はシャットダウンし、加速器を更新する。 (2011年8月)
2. 震災復興による研究教育用の新加速器:
 - 汎用タンデム加速器システム(1階横置きで最大)
AMS, IBA, イオン照射, 原子核実験, etc.
 - 既存の偏極イオン源・大型汎用真空槽・原子核実験装置を活かす
 - 学生の物理・加速器・放射線実験への活用
 - 専用AMSイオン源と測定・解析システムを搭載
AMS 測定: ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca and ^{129}I etc.
 - イオンビーム分析システムを搭載

➡ 6 MV タンデム加速器

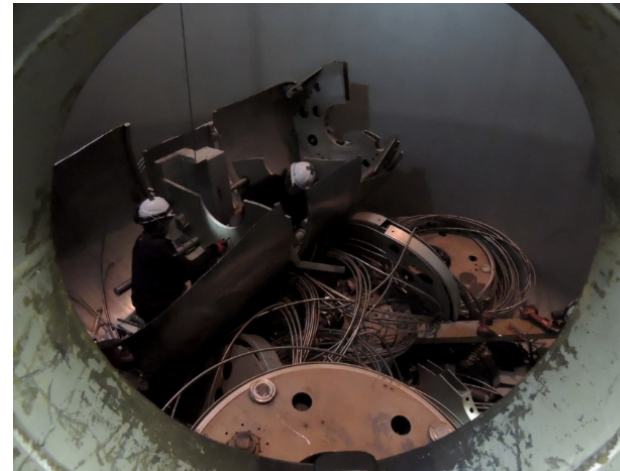


12UDタンデム加速器の廃止と6 MVタンデム加速器の導入

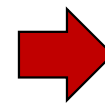


6 MVタンデム加速器承認と同時に廃止を実施

- ・ 計算と実測により放射化範囲を判断
- ・ 12UDタンデム加速器内部は撤去
- ・ 加速器棟は管理区域を解除



Sep.-Oct., 2015



12UDタンデム加速器の廃止措置
(H24年度法令改正後 国内3例目)

- | | |
|------------|------------------------|
| 2015年9月2日 | ・原子力規制委員会 施設変更申請受理 |
| 2016年1月14日 | ・施設検査(原子力安全技術センター) |
| 2016年1月20日 | ・施設検査 合格 |
| 2016年3月1日 | ・6MVタンデム加速器運用開始 |
| | ・12UDタンデム加速器の廃止措置報告 提出 |
| 2016年3月31日 | ・施設工事期間終了 |

2. 筑波大学6 MVタンデム加速器の設計と開発

- 6 MV タンデム加速器の設計
- 加速器システムの構成
- 加速器設置作業



筑波大学
University of Tsukuba

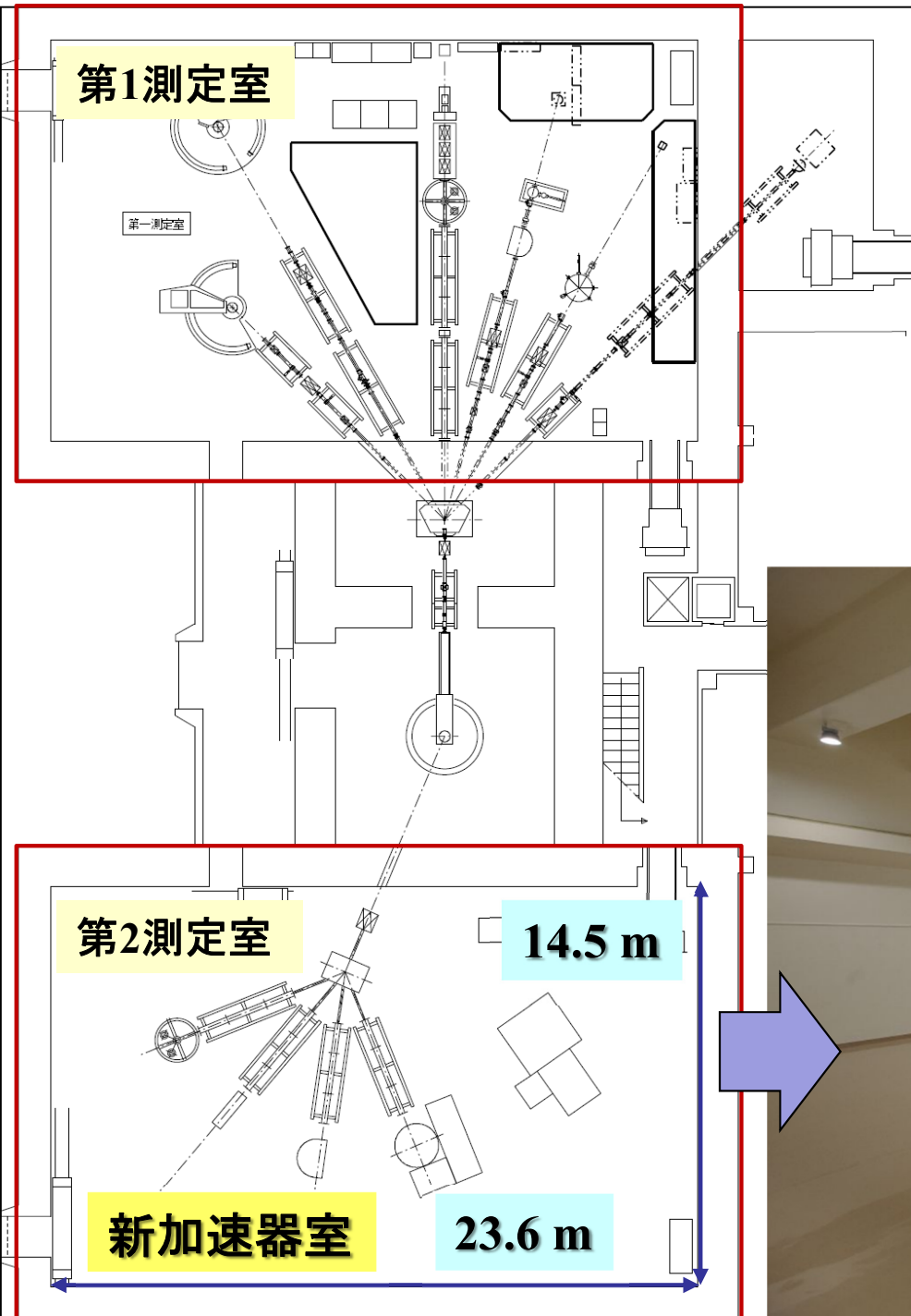
UTTAC

施設改修と加速器設置の制約条件

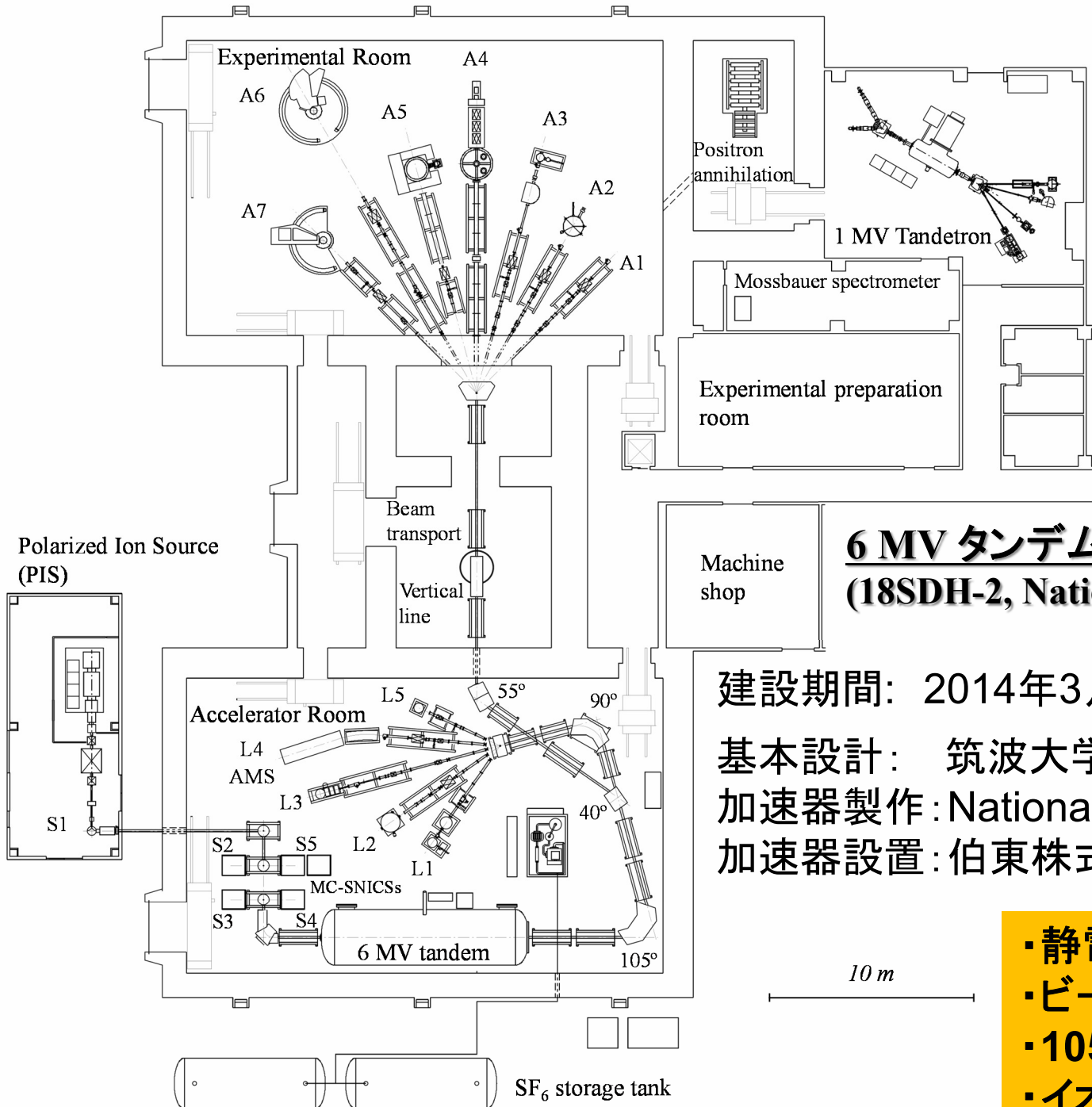
研究施設 1階

測定室 2部屋: $23.6 \times 14.5 \text{ m}^2$
(コンクリート壁厚 1.5m)

→ ユーザー要望を考慮して加速器システムのコンパクト化を検討



筑波大学 6 MV タンデム加速器の設計



Ion Sources : 5
Beam lines : 12
Vertical line : 1

6 MV タンデム型静電加速器システム (18SDH-2, National Electrostatics Corp., USA)

建設期間: 2014年3月~2015年11月

基本設計: 筑波大学

加速器製作: National Electrostatics Corp., USA

加速器設置: 伯東株式会社

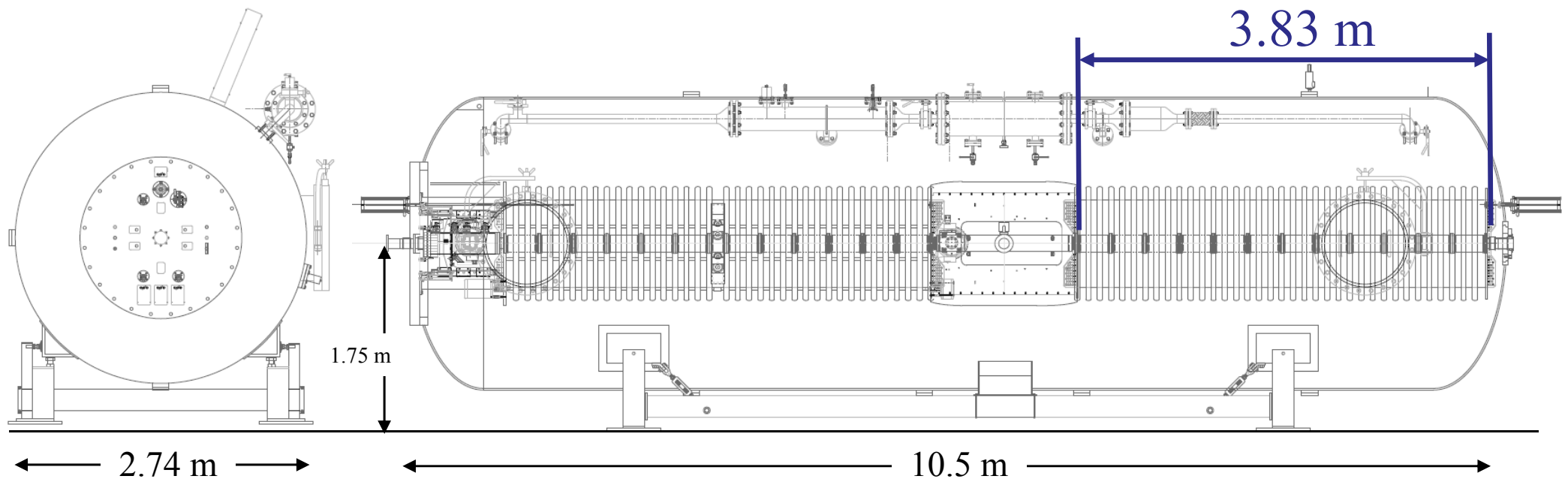
- ・静電加速器本体のコンパクト化
- ・ビームクロスポイントの設置
- ・105° 分析電磁石
- ・イオン源切り替え用ESAの開発

筑波大学 6 MV タンデム加速器



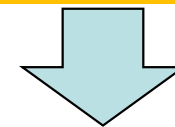
6MVタンデム型静電加速器の設計と開発

ペルトロン型ファン・デ・グラーフ (18SDH-2, National Electrostatics Corp., USA)



コンプレスト型高勾配加速管を12本連結し、強化アクリルパネルで支持してコンパクト化を図る。

- ・ 加速器サイズ: 長さ: 10.5 m
直径: 2.74 m
ビームライン高: 1.78 m
加速器重量: 17.4 metric ton
- ・ ペルトロンチェーン電荷量: 300 μA
- ・ GVM and Slit current feedback system
- ・ 加速電圧範囲: 0.5 - 6.5 MV
- ・ 電圧安定性: < 1 kV V_{p-p} at 6.0 MV
- ・ ビーム電流値(DC): H: 3 μA
Heavy ions: $\sim 50 \mu\text{A}$
- ・ 使用用途: AMS, 物質分析, 照射試験, 原子核実験

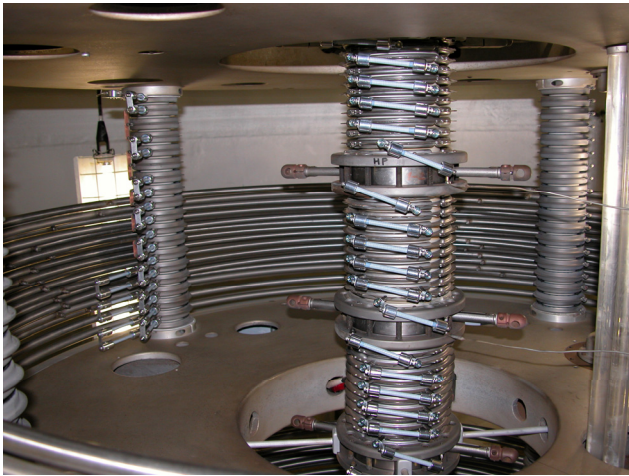


6MV以上の大型静電加速器
に初めて適用



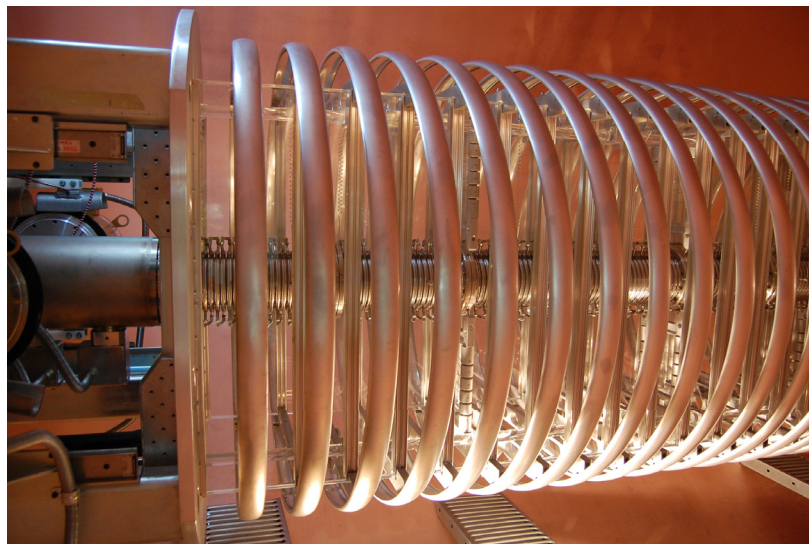
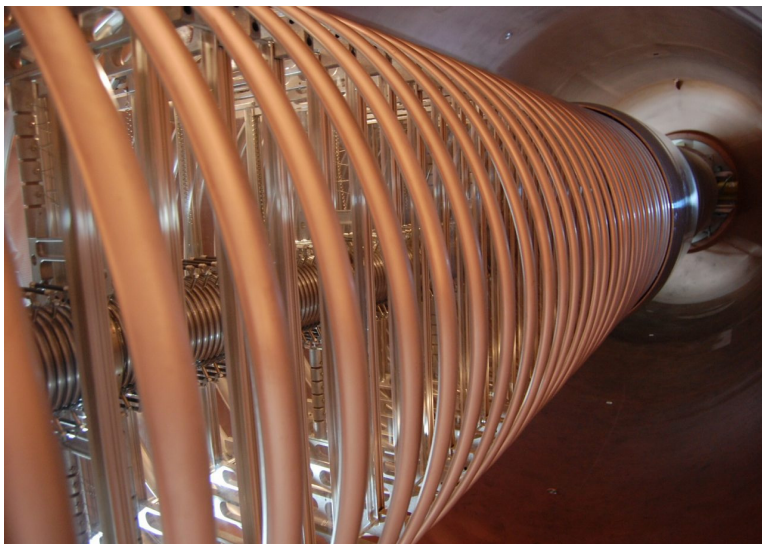
静電加速器の加速管コラム

12UDタンデム加速器



旧大型タンデム加速器の加速管
ユニット構成 1UD= 1MV (3本の加速管で構成)
1 MV / m

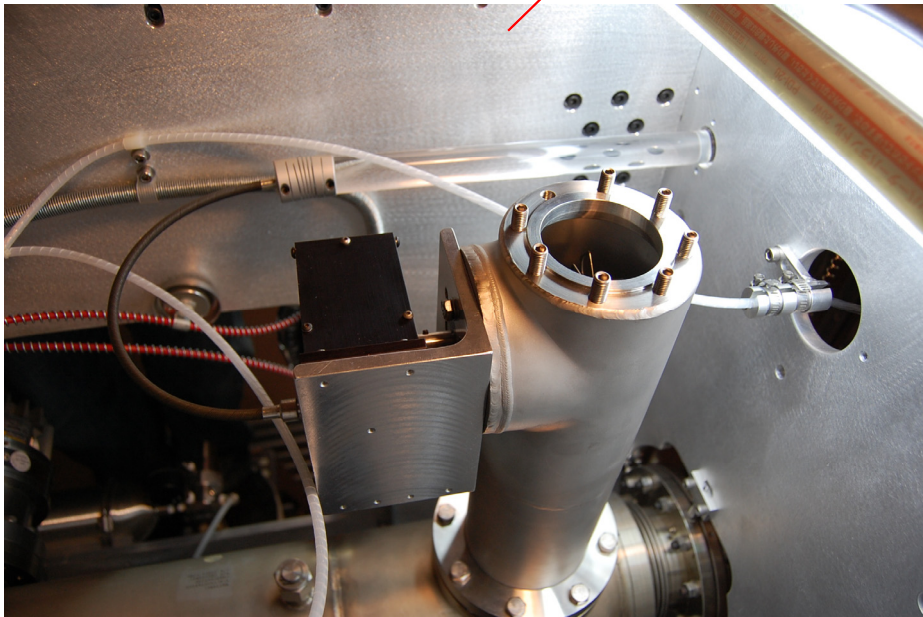
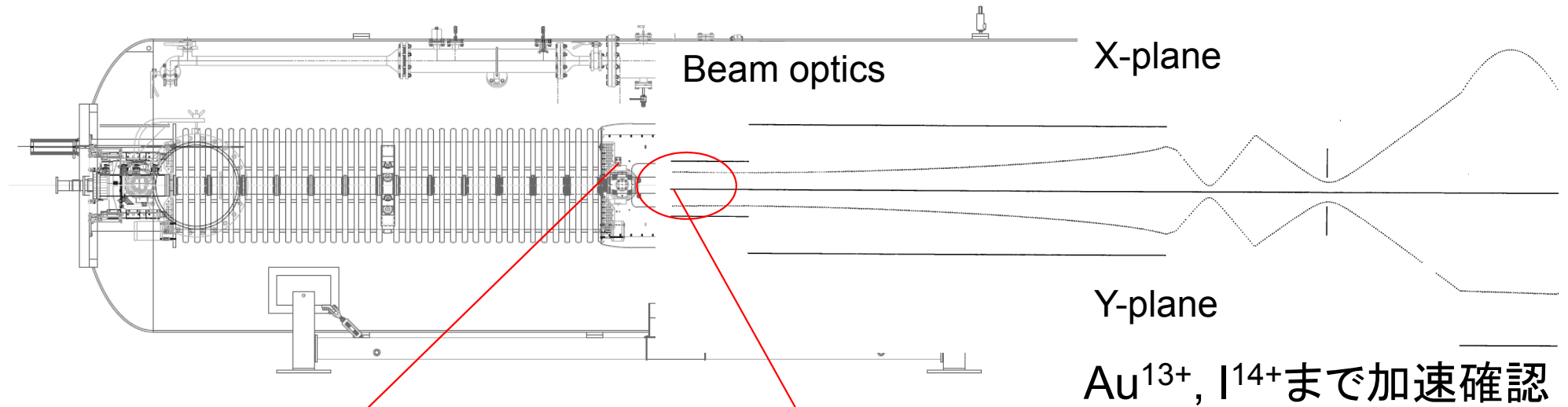
6 MVタンデム型静電加速器



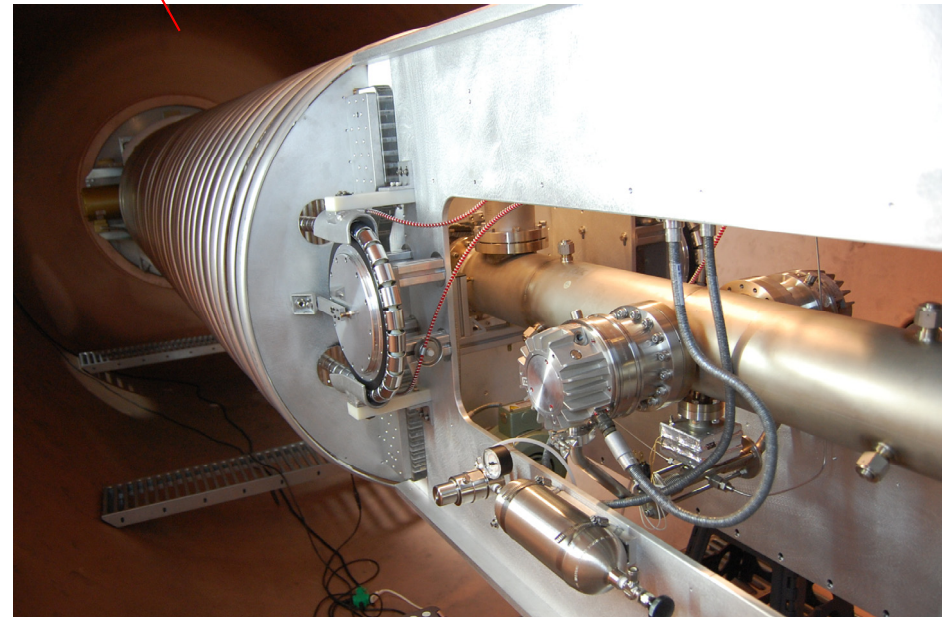
High Gradient Acceleration
Tube

静電加速場において 1.7 MV / m (最高3.3 MV / m)

荷電変換部



foilユニット
装填数: 80枚 (C-foil 3~10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)



循環型Arストリッパチャンネル:
・直径10 mm, 全長950 mm
・Arガス圧 $\sim 10^{-1}\text{Pa}$ (500 L/s TMP 2台)

6MVタンデム加速器の性能

放射線施設の許可(承認)の条件

使用目的: イオンビーム物性の研究、微量元素分析、核物性の研究

名称: ファン・デ・グラーフ型加速装置(タンデム)

加速器時間: 週144時間

最大加速電圧: 6.50 MV

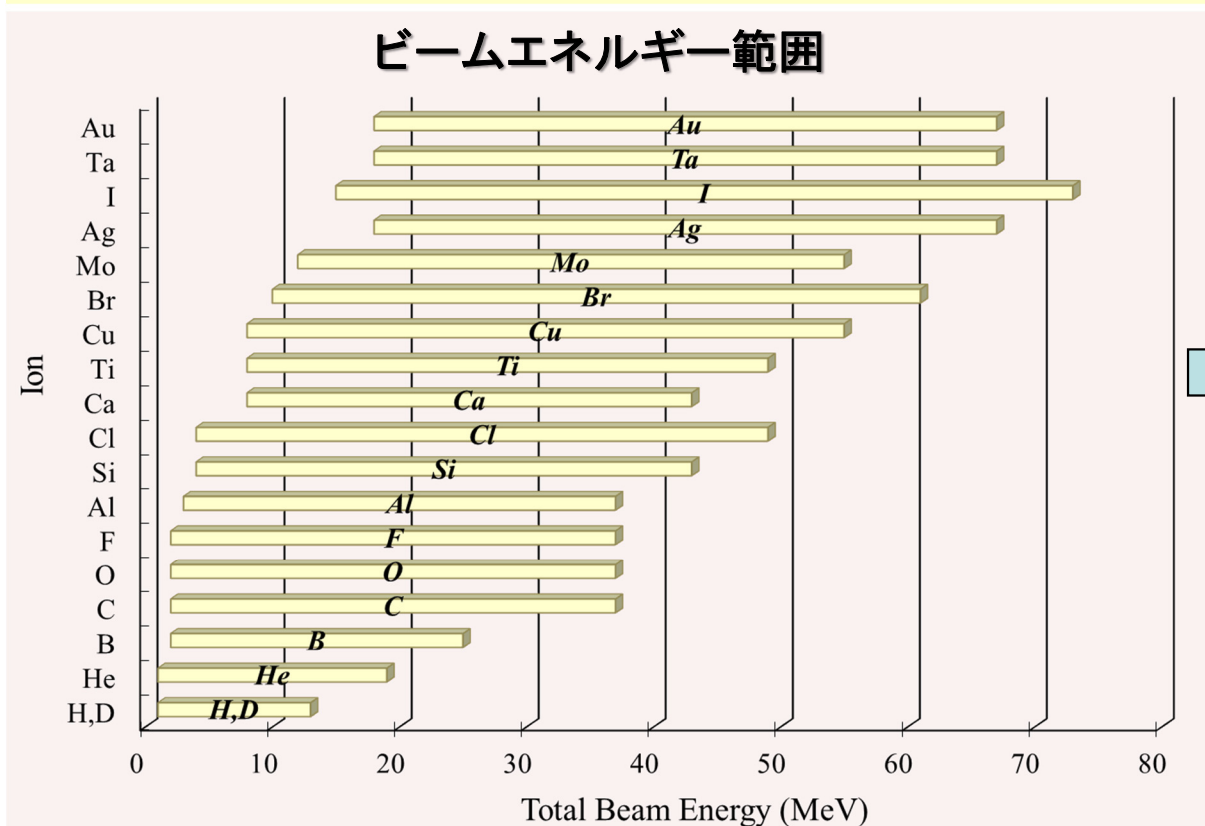
粒子最大エネルギー: 91.00 MeV (原子番号2、質量数 3以上)

粒子最大出力: 50.0 μ A

陽子・重陽子線最大エネルギー: 13.00 MeV

陽子線最大出力: 3.00 μ A

重陽子線最大出力: 0.30 μ A



エネルギー変更は
2 keV単位で可能

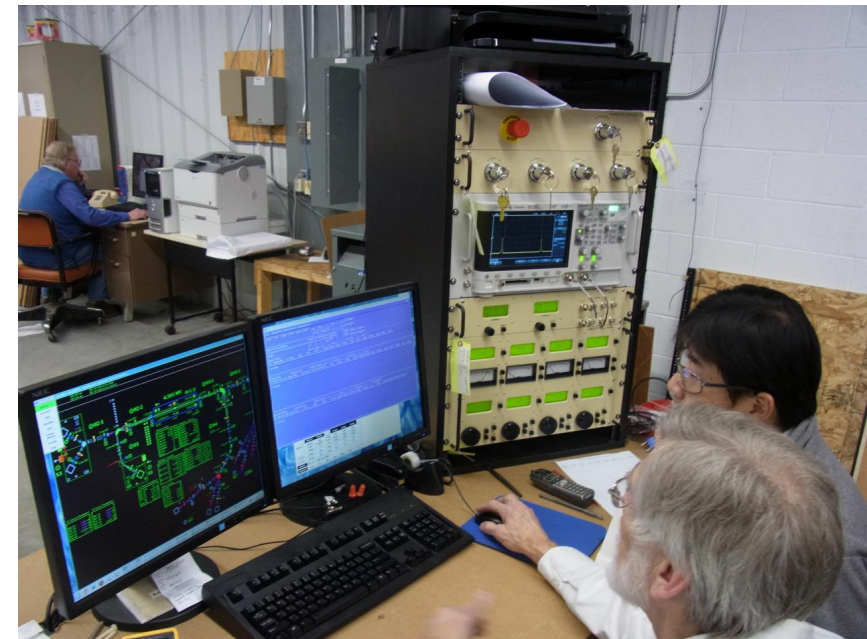


加速器製作と電圧試験 (2013-2014, NEC, USA)

2013年6月～ 加速器組み立て開始



2014年1月～ 加速電圧試験

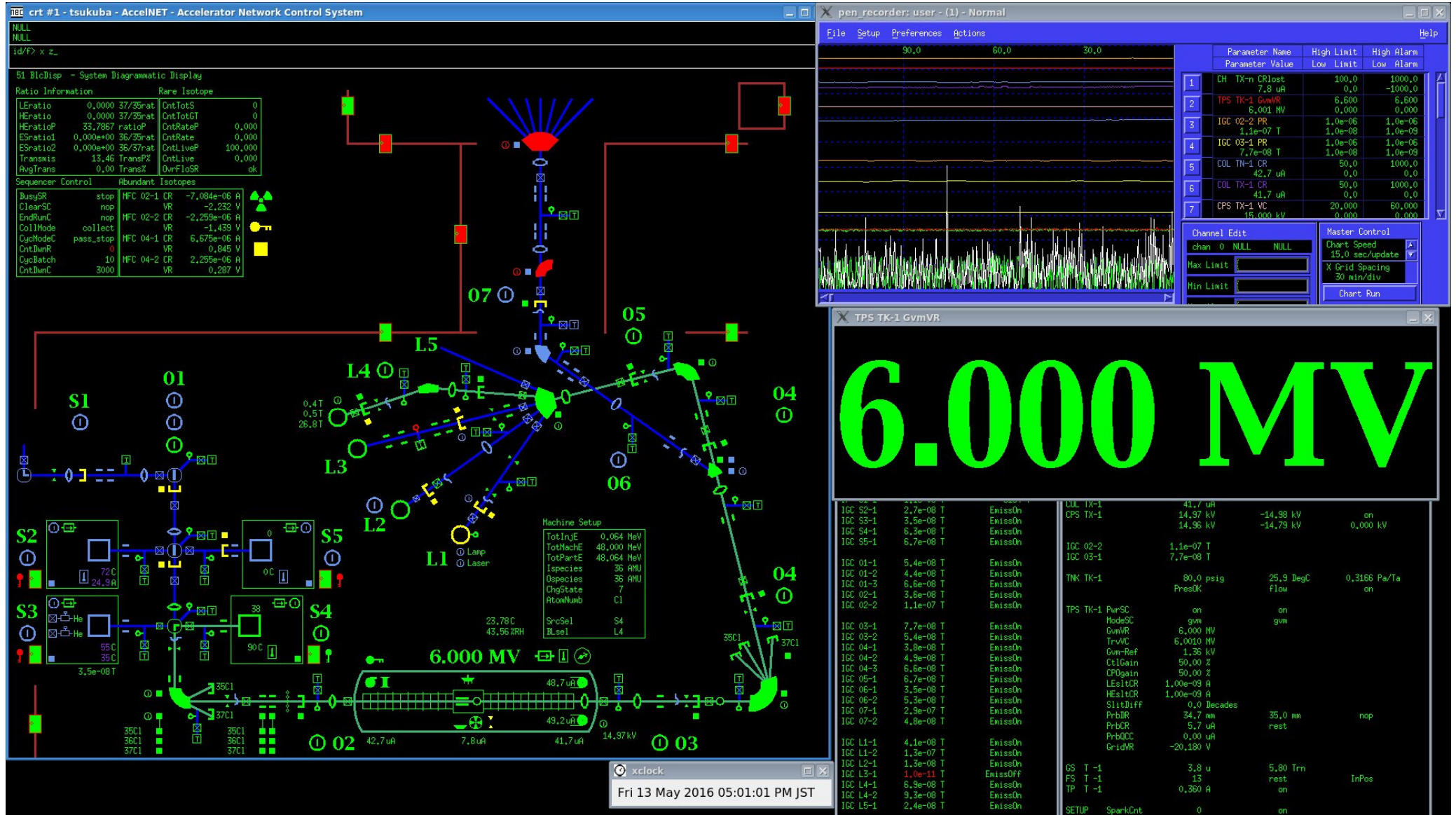


6 MV タンデム加速器本体搬入 (6 Mar, 2014)

10.5 m × 2.74 m, 20.9 ton



6 MV タンデム加速器制御画面



負イオン源システムのコンパクト配置

Injection system

偏極陽子・重陽子

Polarized DC
H⁻ & D⁻ ion
~ 500 nA from PIS

Three 90° rotational
Electrostatic Spherical
Analyzers (ESAs)

AMS用(固体、ガス両用)

CO₂ gas type
MC-SNICS

H~Auイオン

SNICS II

S2

S5

Alphatross

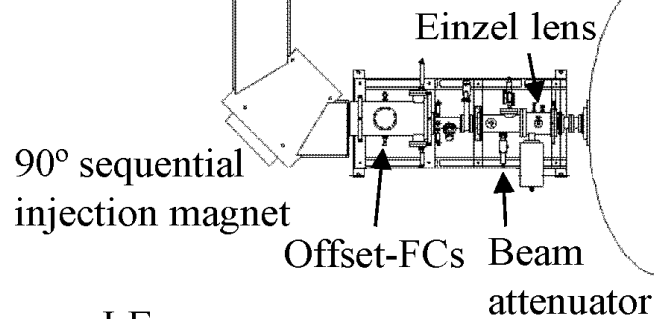
MC-SNICS

Heイオン

S3

S4

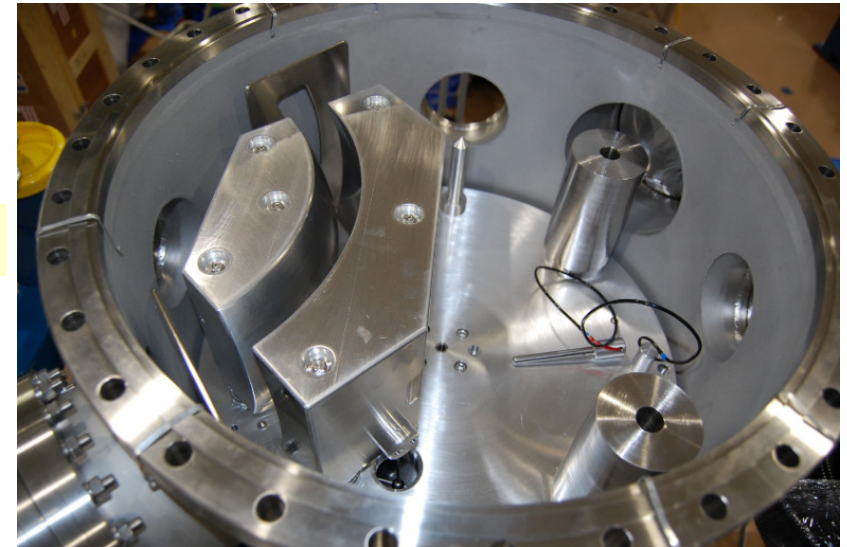
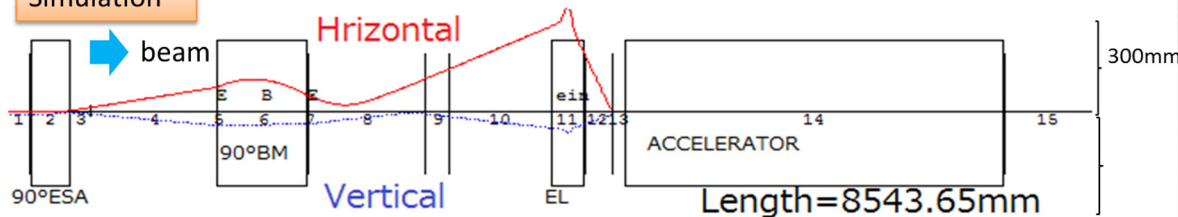
AMS用



入射 65 keV

LE:
 $ME/q^2 = 15 \text{ amu-MeV}$

Simulation



180度回転型Electrostatic Spherical Analyzer (ESA)
(200 mm radius, 35 mm plate separation)



3. イオンビーム利用研究の展望

- イオンビーム利用研究

原子核物理・AMS・宇宙用素子照射試験装置・物質分析

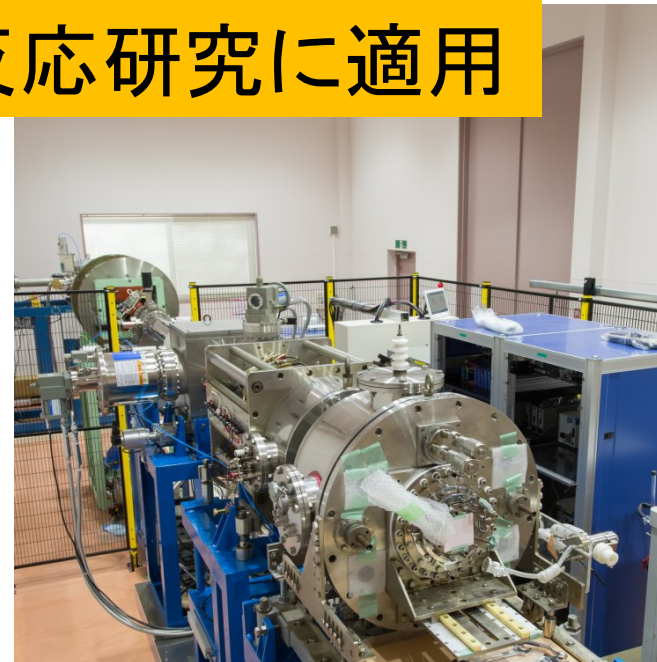


原子核実験 & 偏極負イオン源

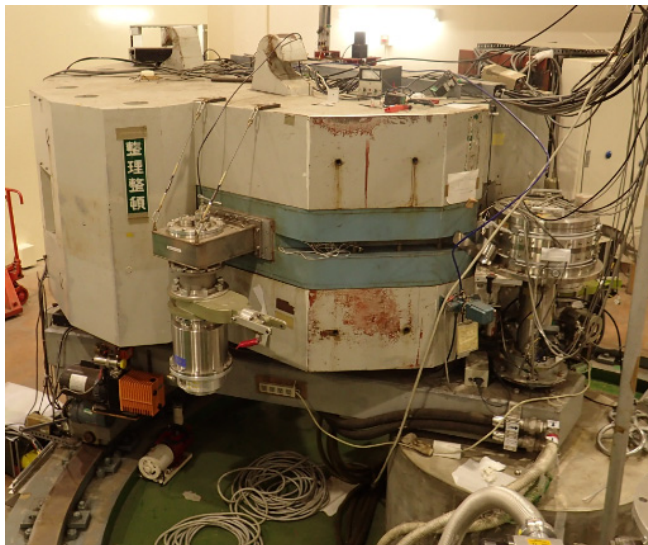
低エネルギー一天体核反応研究に適用



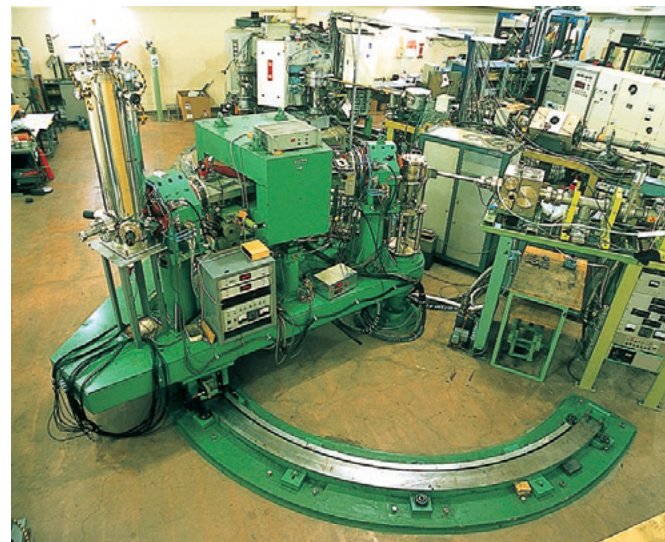
偏極イオン源実験棟



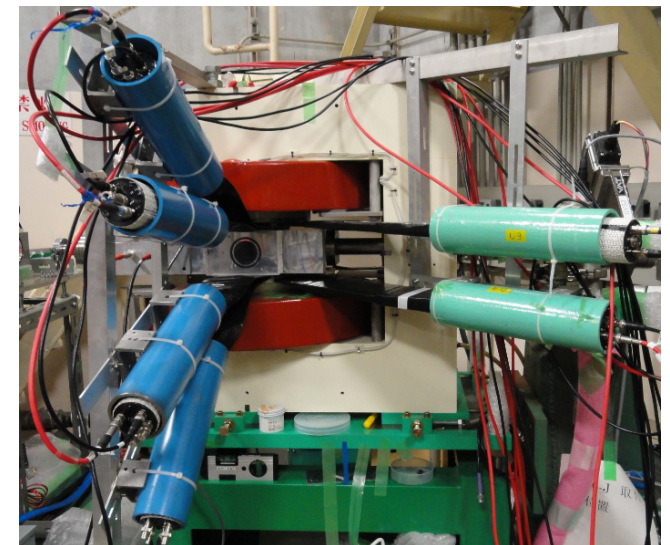
偏極イオン源 (PIS)



測定室のA6コースに設置されている
Engage型Split Pole磁気分析器(ESP90)



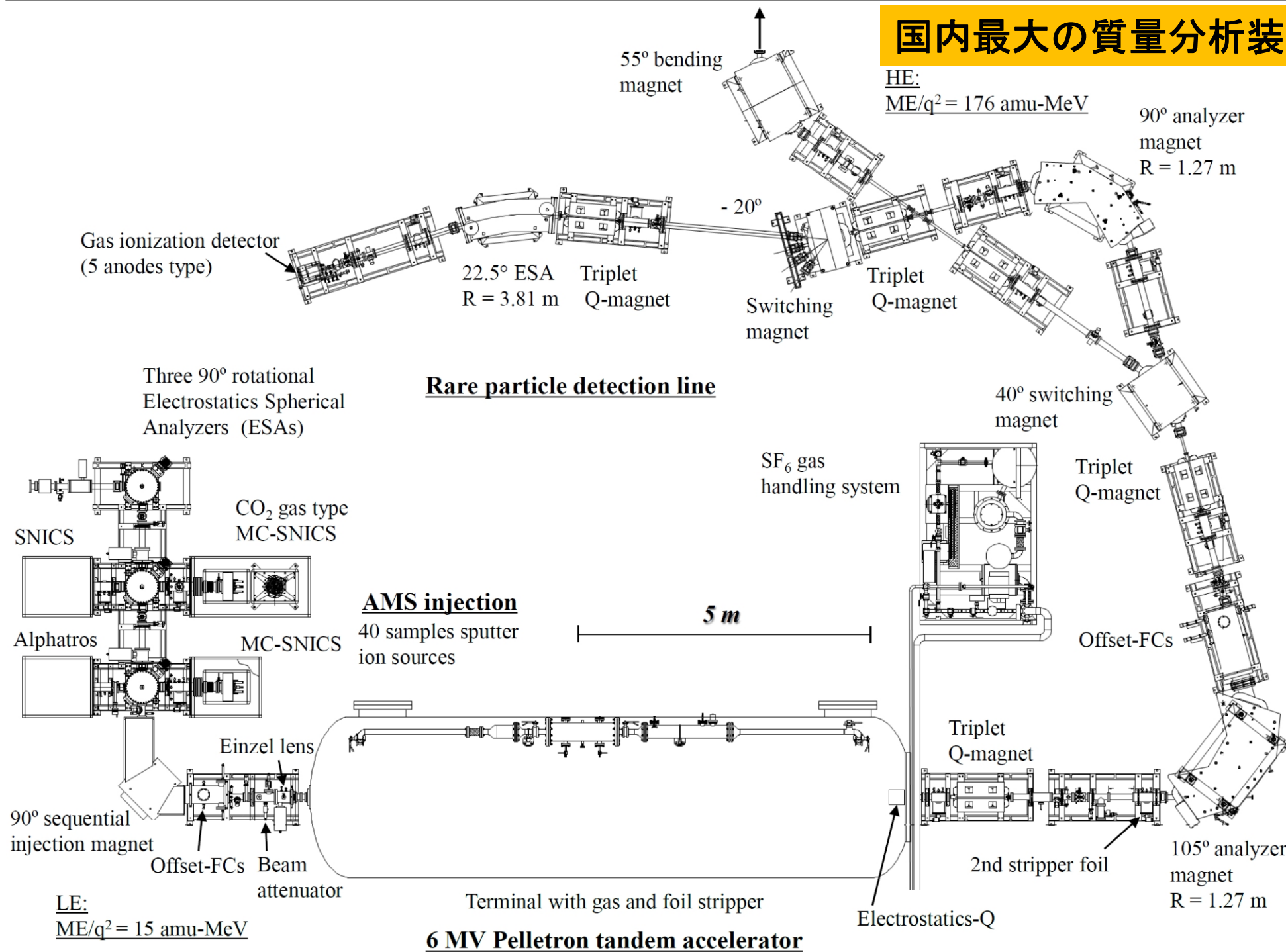
測定室A7コースに設置されている四重極
-双極-四重極電磁石 (QDQ) 磁気分析器



核モーメント測定のセットアップ

6 MVタンデム加速器質量分析(AMS)装置

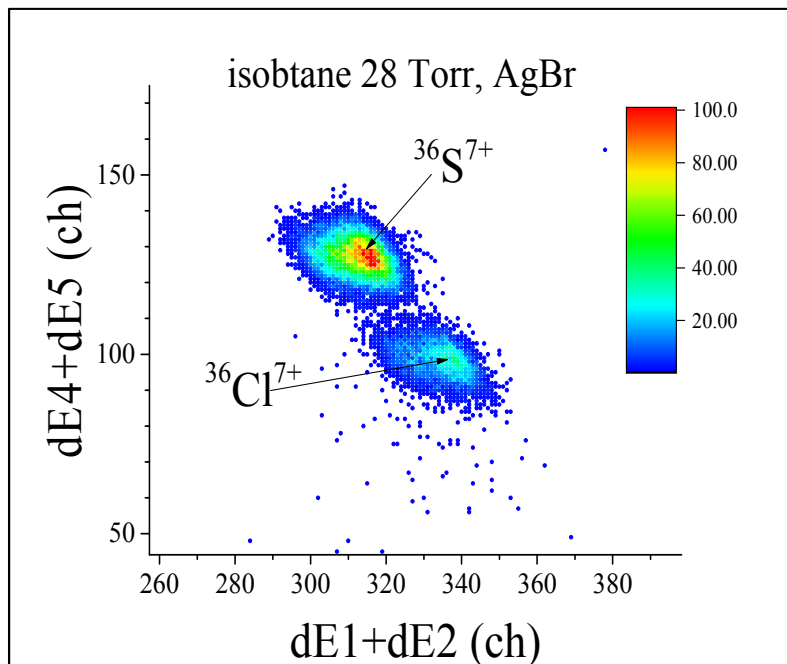
国内最大の質量分析装置



多核種AMS測定の実現

多核種AMS測定： ^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{129}I
長半減期核種の同位体比 $\sim 10^{-15}$ の測定を実現

^{36}Cl -AMS

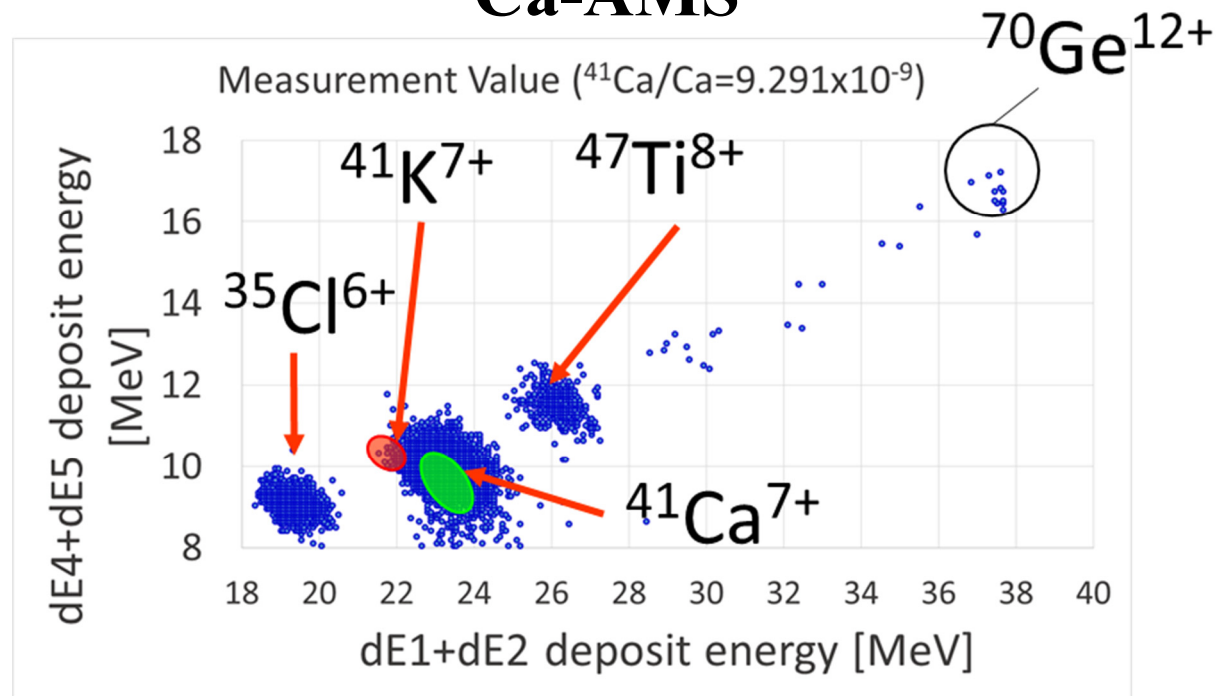


^{36}Cl (半減期 3.01×10^5 yr)

標準試料:

$^{36}\text{Cl}/\text{Cl} = 1.00 \times 10^{-11}$ の測定結果

^{41}Ca -AMS



^{41}Ca (半減期 1.02×10^5 yr)

標準試料:

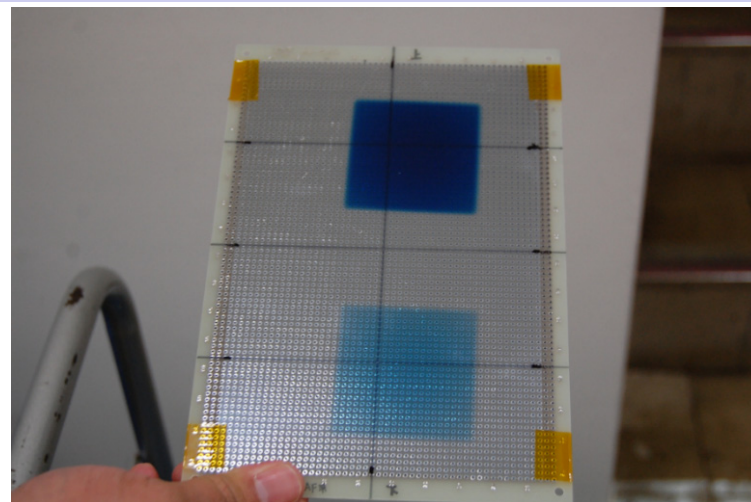
$^{41}\text{Ca}/\text{Ca} = 9.29 \times 10^{-9}$ の測定結果



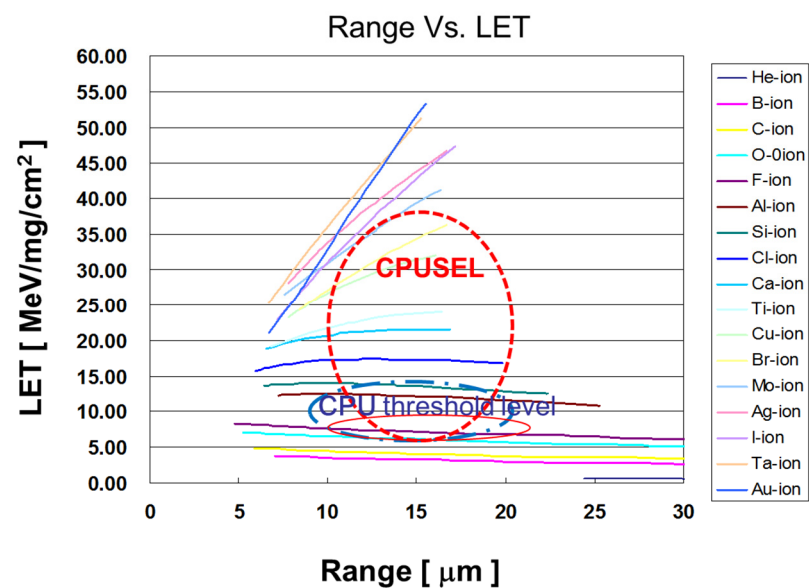
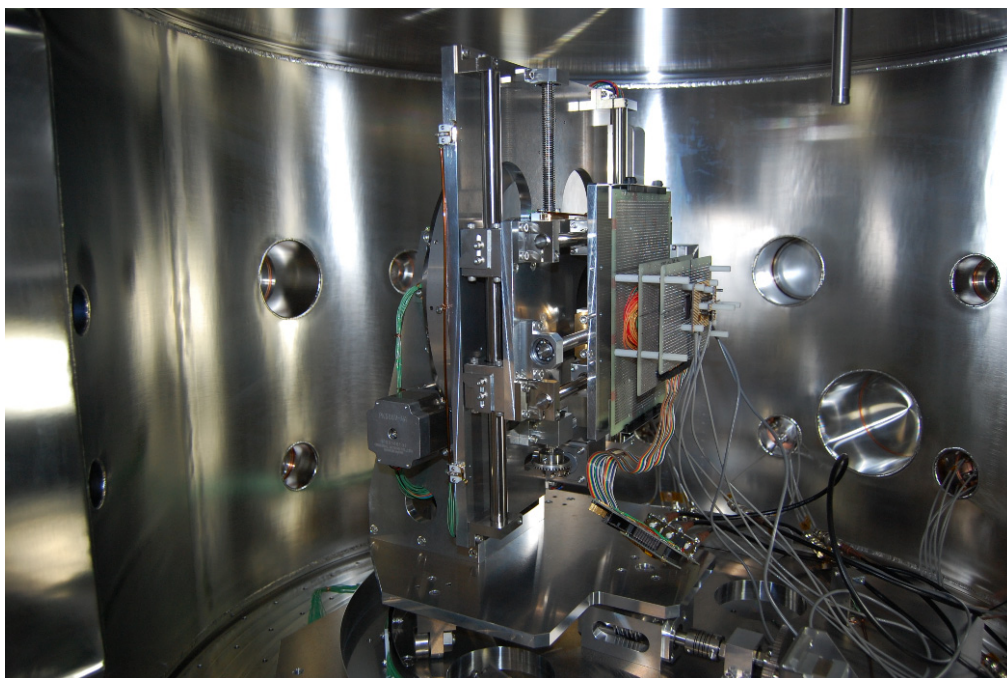
宇宙用素子照射試験装置



宇宙用半導体素子の放射線耐性試験
(JAXA共同研究)



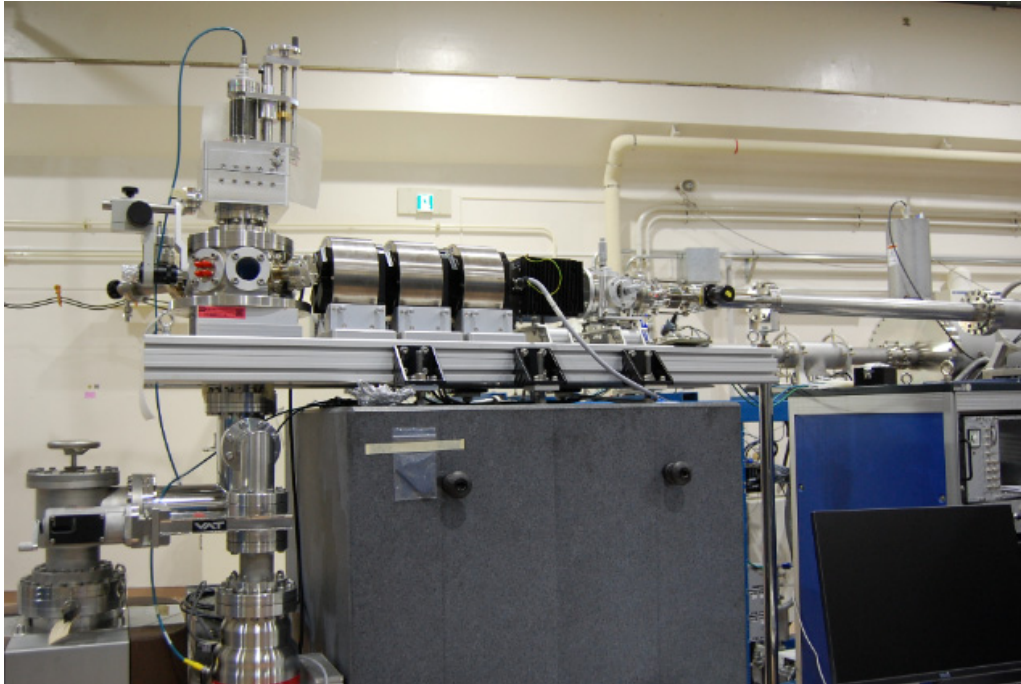
重荷電粒子ビーム大面積均一照射野(50 × 50 mm)
の形成(均一度90%)



物質分析研究

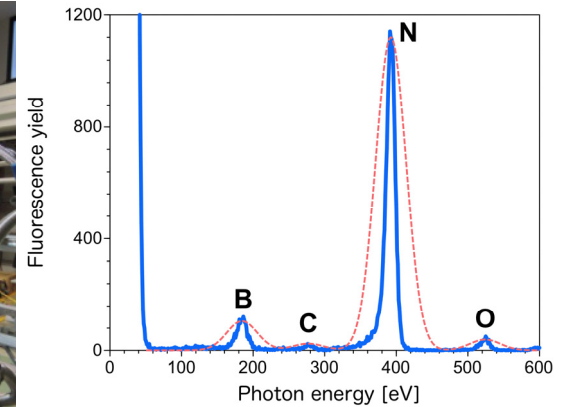
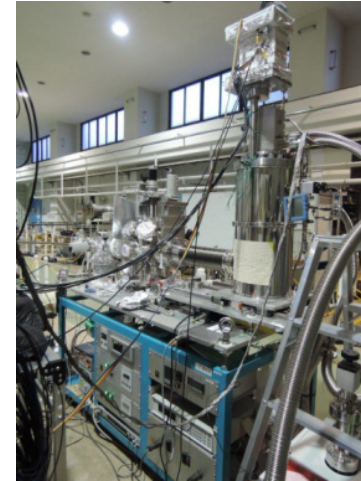
SIP-IMASM

内閣府SIP「革新的構造材料」先端計測拠点



非破壊マイクロビーム物質構造解析装置
(ビームサイズ $< 1 \mu\text{m}$)

イオンビーム物質分析(IBA)装置



超伝導X線計測技術による微量軽元素分離能力
を粒子線励起X線(PIXE)へ応用

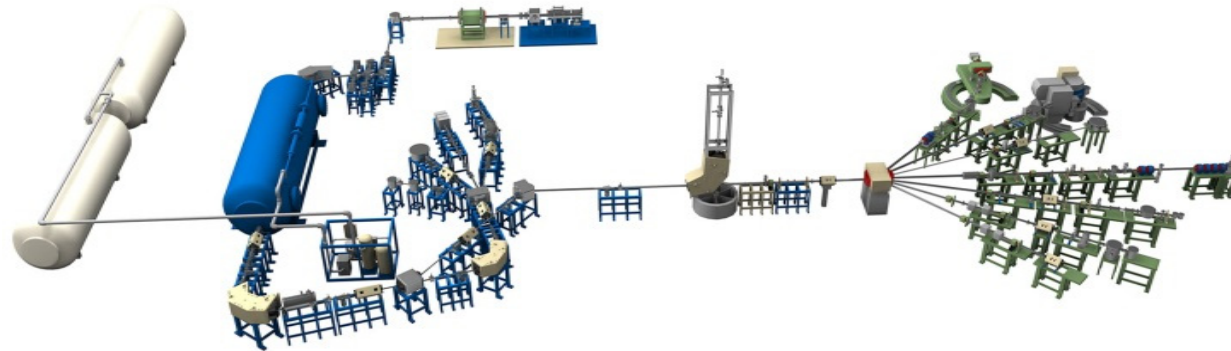
産業技術総合研究所 共同研究



Summary

1. 国内で約**20**年振りとなる大型タンデム加速器として、**6 MV**タンデム型静電加速器の設計と開発をおこなった。加速器の承認は**2015年9月**に得られ、施設検査は**2016年1月20日**付で合格した。加速器の正式運用は、**2016年3月1日**より開始している。
2. 新規の加速器構造体の設計によりコンパクト化を図り、加速電圧**6.5 MV**を達成した (**1.7 MV/m**)。多価イオンの加速では、 $^{127}\text{I}^{14+}$ ビームで**90 MeV, 1.5 nA**を確認した。
3. イオンビームの多目的利用を目指して、偏極負イオン源、AMS装置、宇宙用素子照射試験装置(JAXA共同研究)、マイクロビーム装置(SIP先端計測拠点)、IBA装置を整備した。
4. 国内最大となる**6 MV**タンデム加速器質量分析装置により、 ^{10}Be , ^{14}C , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{129}I のAMS試験測定に成功した。
5. 今後、学際利用研究、産学連携研究を進展させる。

Thank you for your kind attention !



6 MV Tandem Accelerator System since 2016

Acknowledgements

- 筑波大学 関係各位
- 伯東株式会社
- National Electrostatics Corp., USA

