

# 京都大学工学研究科加速器施設の紹介

京都大学 工学研究科 附属量子理工学教育研究センター  
原子核工学専攻

土田 秀次

KYOTO UNIVERSITY

京都大学



化学研究所  
 エネルギー理工学研究所  
 生存圏研究所  
 防災研究所  
 サテライト  
 工学、農学、エネルギー科学

工学研究科原子核工学専攻  
 1961年から利用開始



放射実験室

### 京都大学宇治キャンパス建物配置図



# 施設の変遷

1957 原子核工学教室 創設

1963 宇治キャンパスに”放射実験室”開設 中性子発生装置・未臨界実験装置

1967 南建屋を建設

1968 重イオン核物性実験装置（重イオン・電子バンデ）設置

1969 加速器の共同利用開始

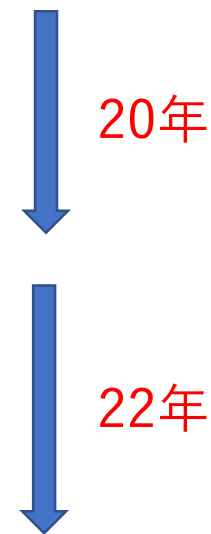
1988 イオンビーム分析実験装置（タンデトロン）設置

1999 量子理工学研究実験センター 設立（10年時限）

2009 量子理工学教育研究センターに改組（時限なし）

2010 量子ビーム生体分子動態解析実験システム（マイクロ）設置

2013 建屋の耐震改修工事



## 装置一覧：イオン加速器3台、電子加速器1台を所有

- 重イオン核物性実験装置（重イオンバンデ、電子バンデ）
- イオンビーム分析実験装置（タンデトロン）
- 量子ビーム生体動態解析システム（マイクロイオンビーム）

## 利用分野

研究分野 原子衝突、放射線物理学、材料科学、生命科学  
イオンビーム分析

学生実験（原子核工学コース学部3回生、理学部物理学部3回生）

社会啓蒙活動 オープンキャンパス（2日間100名）

高大連携の実験実習（毎年20名程度参加）



# 重イオンバンデ シングルエンドファンデ グラフ型加速器 VI-40 三菱電機

導入年度	1969年
イオン源	PIG型 H, He-3,4, C, O, N, CO, CO <sub>2</sub> など
ターミナル電圧	2.0 MV
ビーム電流量	10 $\mu$ A
加速エネルギー範囲	0.3 ~ 2.0 MeV



KYOTO UNIVERSITY



材料照射実験

原子衝突実験

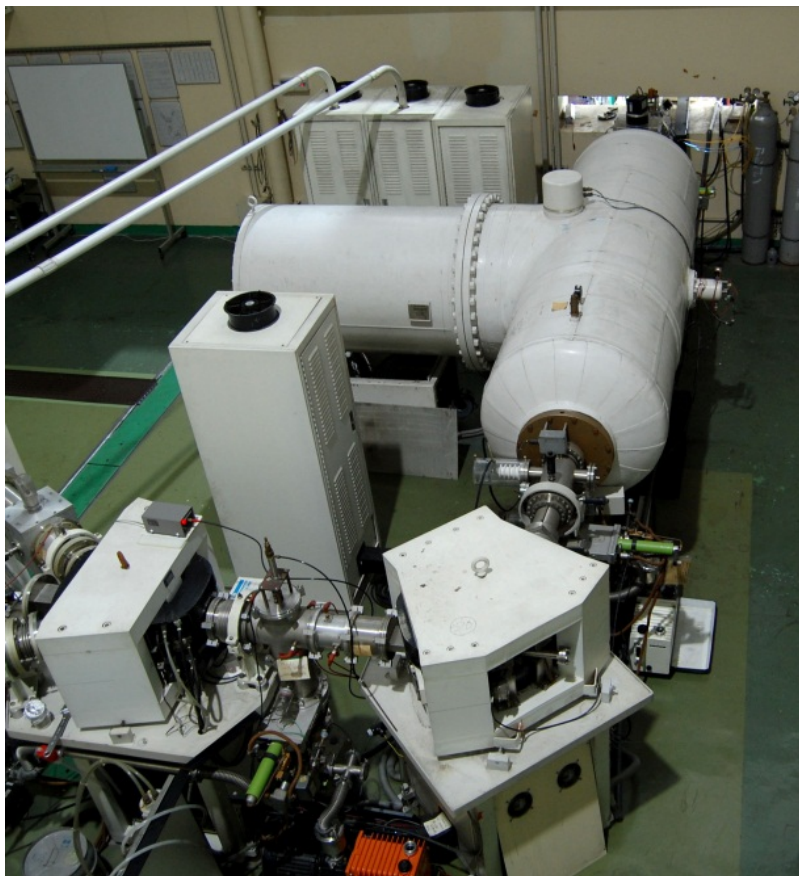
大気中試料の  
イオンビーム分析

表面散乱実験

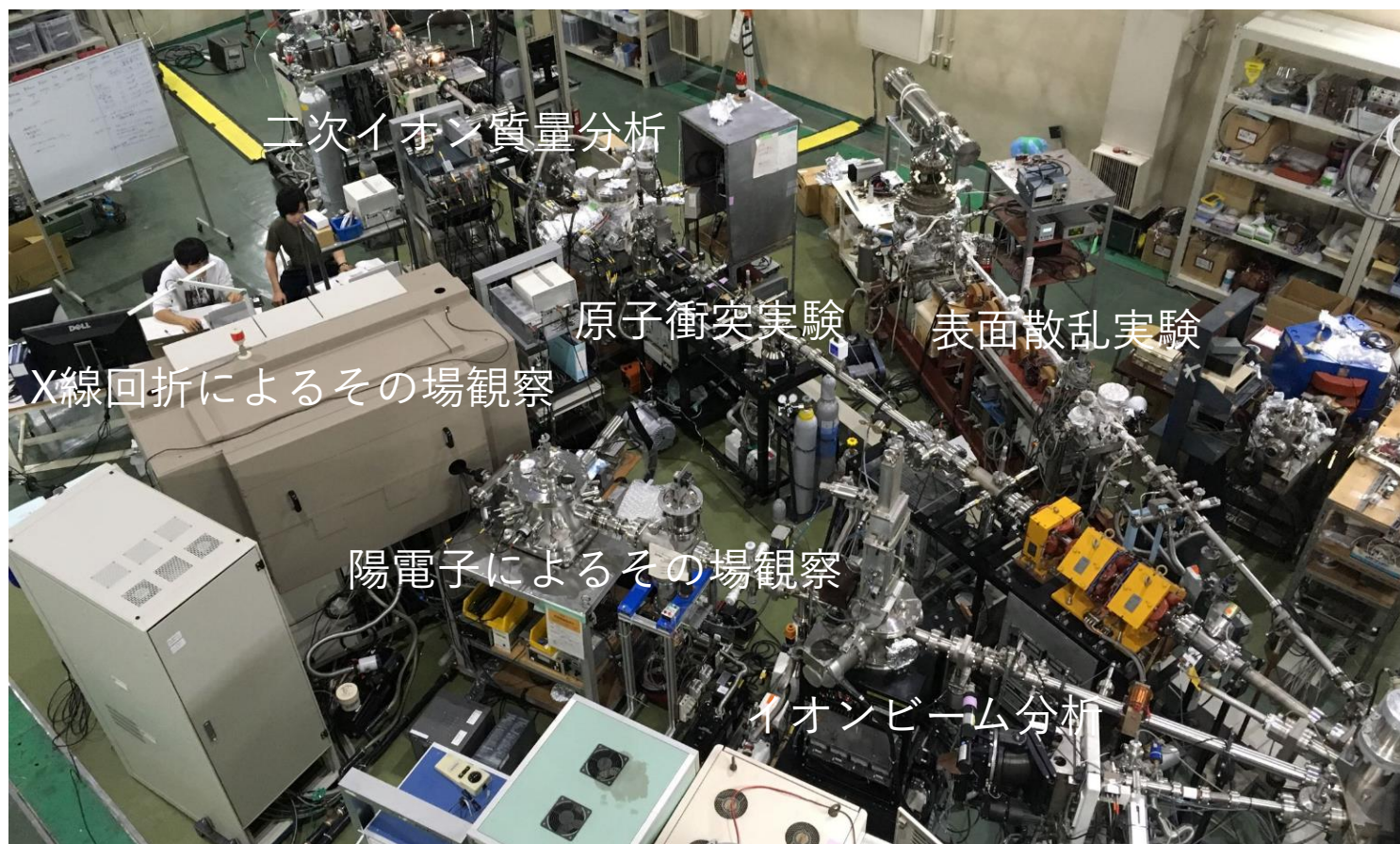


# タンデトロン

コッククロフト・ワルト  
ン型タンデム加速器  
4117 セイコ電子工業



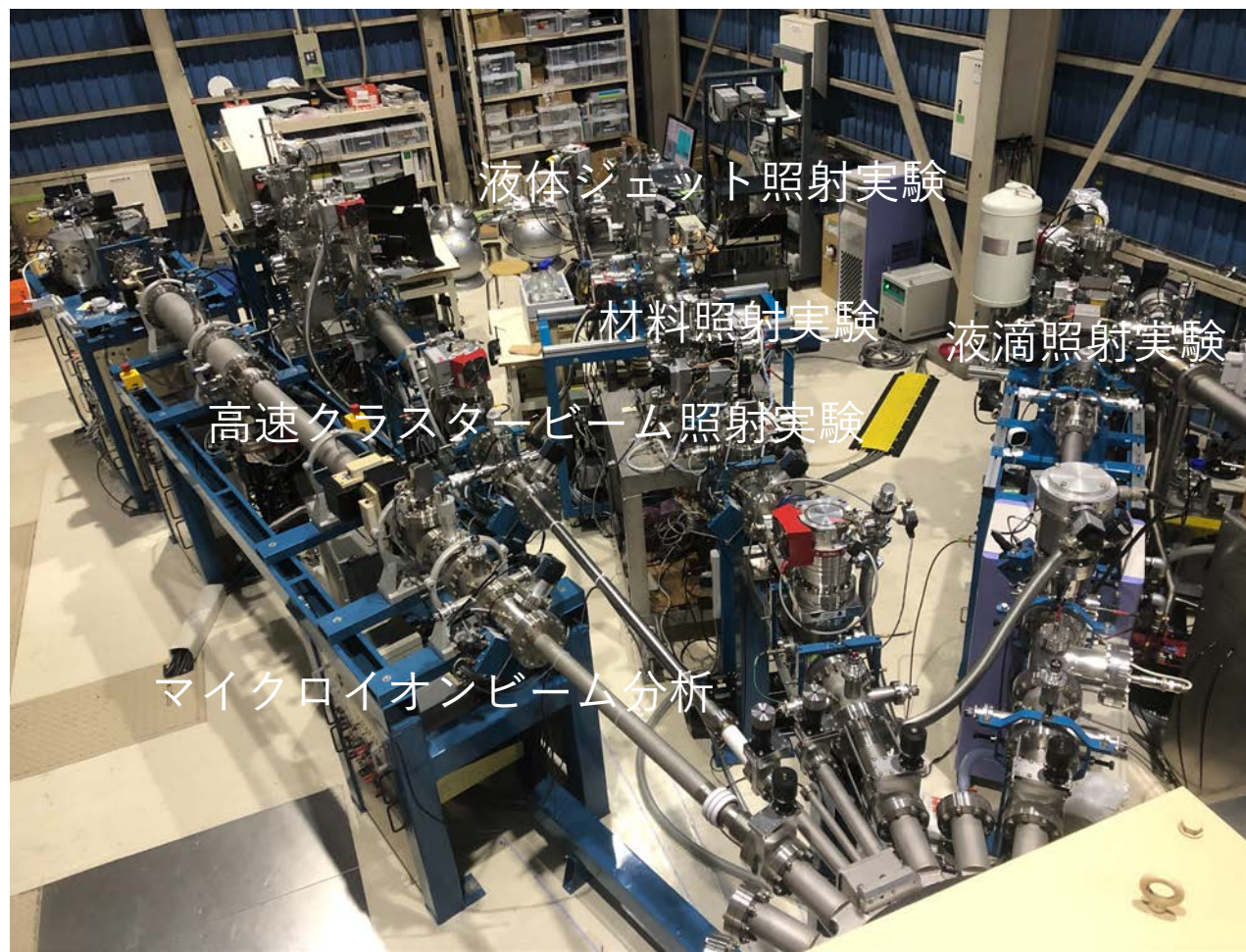
導入年度	1988年
イオン源	デュオプラズマLi荷電変換負イオン源 Csスパッタ負イオン源
ターミナル電圧	1.7 MV
ビーム電流量	1 $\mu$ A
加速エネルギー範囲	0.4 ~ 6.0 MeV





# マイクロビーム タンデムペレットロ加速器 6SDH-2 米国NEC

導入年度	2010年
イオン源	RF-Rb荷電変換負イオン源 Csスパッタ負イオン源
ターミナル電圧	2.0 MV
ビーム電流量	1 $\mu$ A
加速エネルギー範囲	0.4 ~ 10.0 MeV



液体ジェット照射実験

材料照射実験

液滴照射実験

高速クラスタービーム照射実験

マイクロイオンビーム分析



# 電子バンデ

シングルエンドファンデ  
グラフ型加速器  
VE-20 三菱電機

導入年度	1969年
加速粒子	電子 (制動X線照射用)
ターミナル電圧	2.0 MV
ビーム電流量	20 $\mu$ A
加速エネルギー範囲	0.3 ~ 2.0 MeV

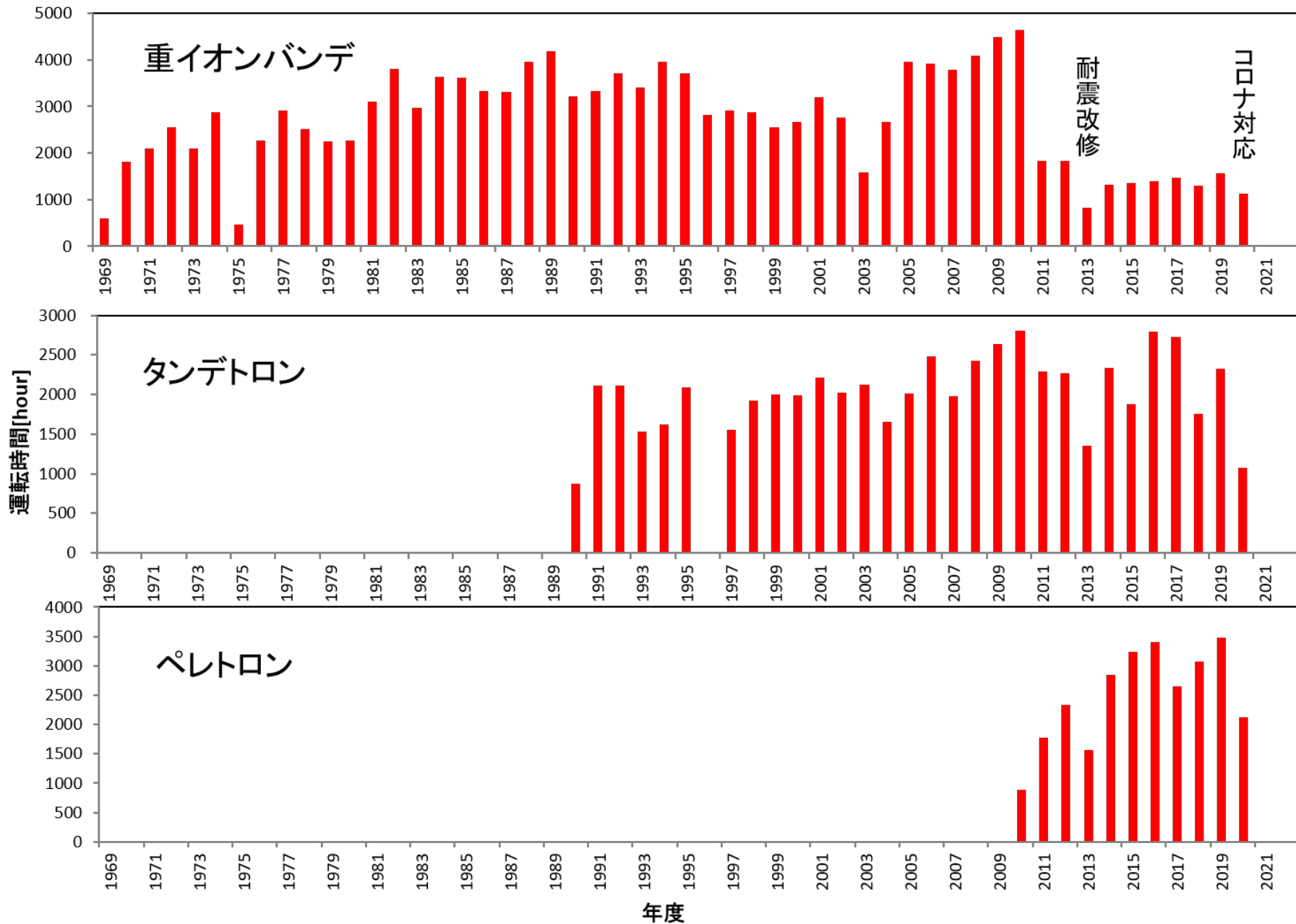


KYOTO UNIVERSITY





# 加速器 稼働時間

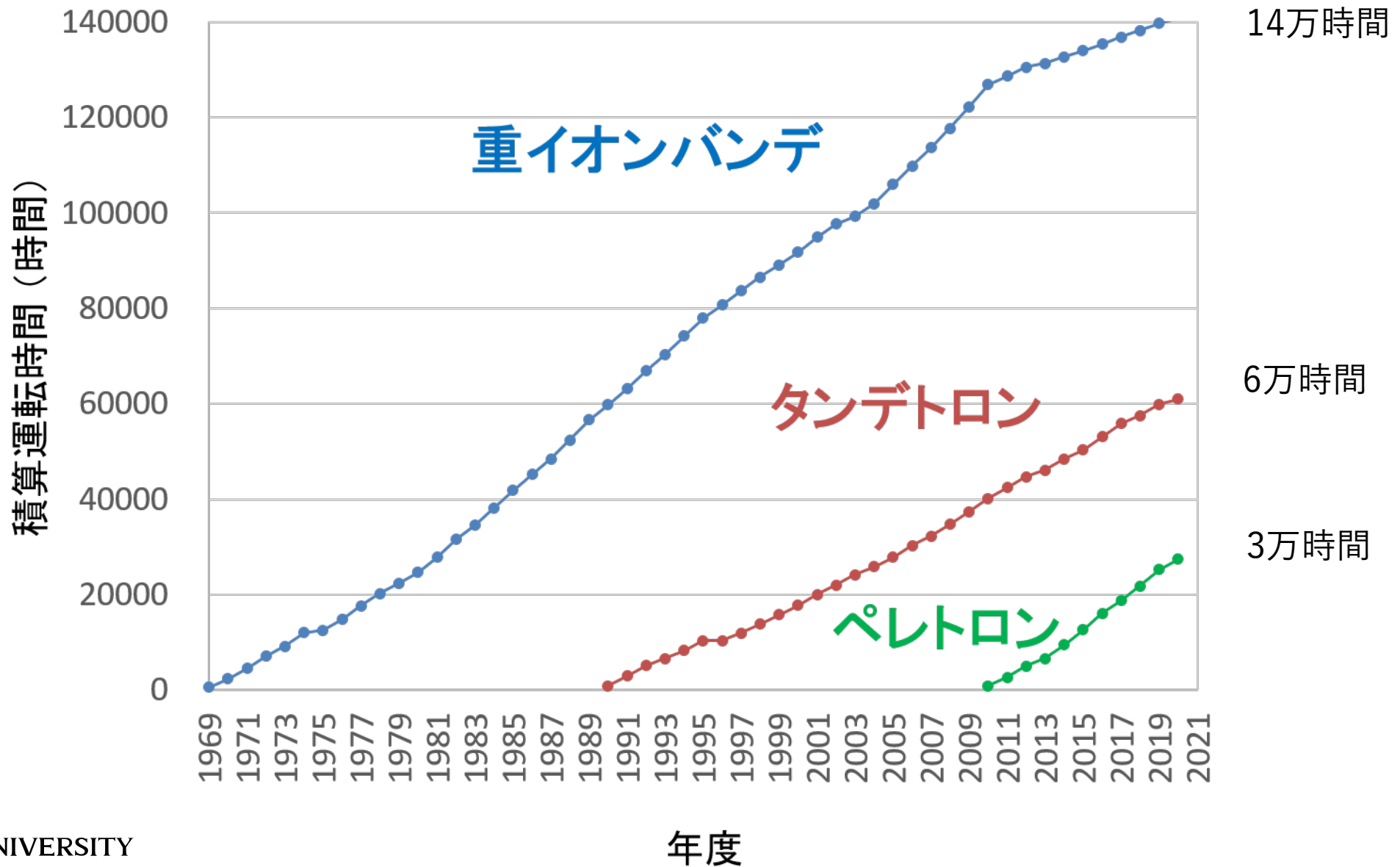


約1,000時間

約2,000時間

約3,000時間

# 総運転時間





# 運営体制

- 加速器維持グループ

原子核工学専攻・量子理工学教育研究センターの教職員：7名

技術職員：2名

研究支援員：1名 の合計10名から組織

活動内容：装置の保守点検・維持管理、利用計画の立案等

- 予算

センターの運営経費の一部を「加速器維持経費」として計上

- 利用者

○年間のマシンタイム制（1週間、1/2週間単位）

4月中旬に割り当て相談会を実施

○学外の方が利用可能

委託分析サービスも実施

○使用料金：マシンタイムの回数に応じて設定

# 加速器維持グループ

センター長 高木郁二

教職員

齊藤学、松尾二郎、間嶋拓也、今井誠、瀬木利夫、土田秀次

技術職員

内藤正裕、佐々木善孝

研究支援員

平山千秋



# マシンタイム

2021 (令和3) 年度重イオン核物性実験装置・イオンビーム分析実験装置・マイクロビーム実験装置マシンタイム表  
(2021年4月12日 決定) (日付は月曜日)

年間 45週  
15グループ  
学内 13

- ・原子核工学
- ・量子理工学
- ・マイクロエンジニア
- ・材料化学
- ・電子工学
- ・理学部物理
- ・化研
- ・複合研

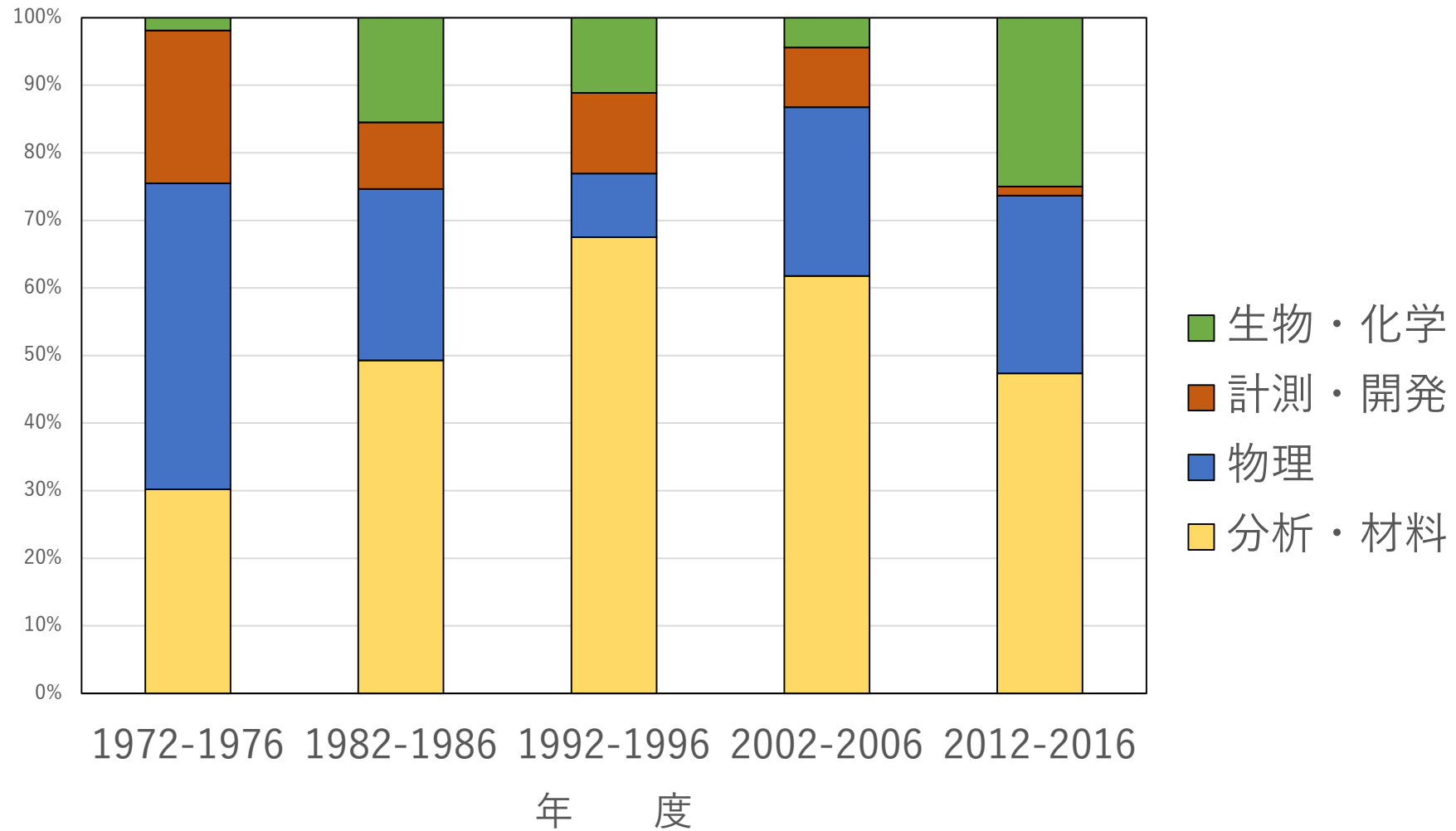
学外 3

- ・京都府立大
- ・名城大
- ・委託分析 (2)

5		6					7					8					9					10													
3		10	17	24	31	7	14	21	28	5	12	19	26	2	9	16	23	30	6	13	20	27	4	11											
重イオン	斜線	維	k	A	維	維	Z	k	A	分	維	k	A	維	維	斜線	維	Z	A	k	維	A	Z	学O											
ビーム分析	斜線	維Q	ZZ	ZA	h維	QQ	維	hL	AQ	ZZ	QZ	維分	QQ	L維	ZZ	斜線	k維	hA	QQ	Z維	ZZ	k維	維L	維分											
マイクロビーム	斜線	ZZ	Z分	AZ	gn	f分	x維	ZZ	Zf	cZ	ZZ	rn	AZ	f維	Z維	ZZ	gn	Zn	分Z	DD	分g	ZZ	cZ	Z学											
11		12					1					2					3																		
18		25	1	8	15	22	29	6	13	20	27	3	10	17	24	31	7	14	21	28	7	14	21	28											
重イオン	学	A	k	維	Z	A	k	維	A	k	斜線	維	Z	A	維	維	分	O	維	A	維	維	維	斜線											
ビーム分析	k維	h維	QQ	維Z	kZ	ZA	QQ	L維	k維	ZZ	斜線	維分	QQ	Z維	維Q	維分	ZZ	維L	k維	維	QQ	維	維	斜線											
マイクロビーム	Z学	ZA	ZZ	xZ	Zf	分A	ZZ	gf	cn	Z維	斜線	維Z	ZZ	rDD	fx	分維	Z維	n維	Zn	Zf	g維	維	維	斜線											
略号	実験題目、所属、実験責任者、連絡者、TEL											略号	実験題目、所属、実験責任者、連絡者、TEL											略号	実験題目、所属、実験責任者、連絡者、TEL										
A	イオンビームによる核材料の研究 工・原子核工学 高木郁二(15-3915) 山口(15-3920)											f	PLD法およびミストCVD法で作製した酸化物薄膜の組成分析 工・材料化学 藤田晃司(15-2432) 久保中(15-2414)											X	金属材料の表面照射自由向上に関する基礎研究 複合原子力科学研究所 徐 軋(18-2417)										
Q	高速イオン照射による生体高分子材料の二次イオン質量分析 工・量子理工学、原子核工学 松尾二郎(17-3977) 瀬木(17-3977)											g	真空ナノエレクトロニクス 工・電子工学 後藤康仁(15-2279)											学	原子核工学コース学生実験(大気PIXE・RBS分析) 工・原子核工学、量子理工 今井 誠(15-3905) 斉藤(17-3970) 土田(17-4895) 間嶋(17-4894)										
Z	高速イオン-液体相互作用、高速イオン-分子衝突ダイナミクス、イオン照射その場観察、マイクロビーム照射科学、クラスター衝突 工・量子理工学、原子核工学 斉藤 学(17-3970) 土田(17-4895) 間嶋(17-4894) 今井(15-3905)											h	TOF-ERDA装置の開発と軽元素分析への応用 京都府立大学・生命環境科学 安田啓介(075-703-5442)											分	イオンビームによる分析支援サービス 工・原子核工学、量子理工 高木郁二(15-3915) 斉藤(17-3970) 土田(17-4895) 間嶋(17-4894)										
D	大気汚染物質の組成分析 工・原子核工学 高木郁二(15-3915) 山口(15-3920)											k	高速イオンと表面の相互作用 工・マイクロエンジニアリング 中嶋 薫(15-3707)											O	オープンラボ キャンパス一般公開、高大連携活動、等										
L	蓄電固体界面のERDA分析 工・原子核工学 間嶋拓也(17-4894) 安田啓介(075-703-5442) 土屋 文(052-832-1151)											n	イオンビーム分析を用いた電極/固体電解質界面のリチウム挙動解析 名城大学、名古屋産業科学研究所 土屋 文(052-832-1151) 森田											維	予備、加速器閉鎖維持、保守点検 維持グループ 高木(15-3915) 松尾(17-3977) 土田(17-4895) 斉藤(17-3970) 間嶋(17-4894) 今井(15-3905) 瀬木(17-3977) 内藤(17-4914) 佐々木(17-4885)										
c	フェリ磁生体エピタキシャル薄膜の組成分析 化研 菅 大介(17-3114)											r	理学部物理科学課題演習(学部3回生実験) A5 自然における対称性 理・物理学第二教室 永江知文(16-3854)																						

マシンタイム始めと終わりの月曜日は必ず加速器利用者懇談会に出席して下さい。(重イオン2階、午前9時30分、祝日除く) 【京都大学大学院工学研究科附属量子理工学教育研究センター】

# 実験テーマの変遷





別表第1 (第9条第1項関係)

# 利用料

利用者が加速器  
運転する場合

設備名称	利用単位	利用料単価			センター 利用登録料 (1会計年度)
		第4条第1項 第1号に掲げ る者	第4条第1項 第2号に掲げ る者	第4条第1項 第3号に掲げ る者	
重イオン核物性実験装置	週あたり	8,000円	20,000円	360,000円	31,000円
イオンビーム分析実験装置 タンデム型イオン加速器 一式	半週あたり	4,000円	10,000円	176,000円	
量子ビーム生体分子動態解 析実験システム	半週あたり	4,000円	10,000円	200,000円	

別表第2 (第9条第1項関係)

委託  
加速器の運転  
実験の実施  
データ解析  
全てを委託する場合

設備名称	委託単位	委託料単価		
		第4条第1項 第1号に掲げ る者	第4条第1項 第2号に掲げ る者	第4条第1項 第3号に掲げ る者
重イオン核物性実験装置	1日あたり	56,000円	60,000円	109,000円
イオンビーム分析実験装置 タンデム型イオン加速器 一式	1日あたり	59,000円	63,000円	107,000円
量子ビーム生体分子動態解 析実験システム	1日あたり	56,000円	72,000円	117,000円

# MeV領域のイオンビームの特徴

- ・ 物質中での高い直進性
- ・ ビームの種類が多彩
  - HからAu, 原子が集団となったクラスタービーム
- ・ ビーム自体が物質
- ・ 物質中でのエネルギー損失が大きい
  - イオンの速さは、物質中の原子に束縛されている電子の平均軌道速度と同程度
- ・ 物質との相互作用
  - 2体衝突、荷電変換衝突、多重散乱など



# MeVイオンビーム分析

用途  
元素、組成、深さ、  
膜厚などの分析

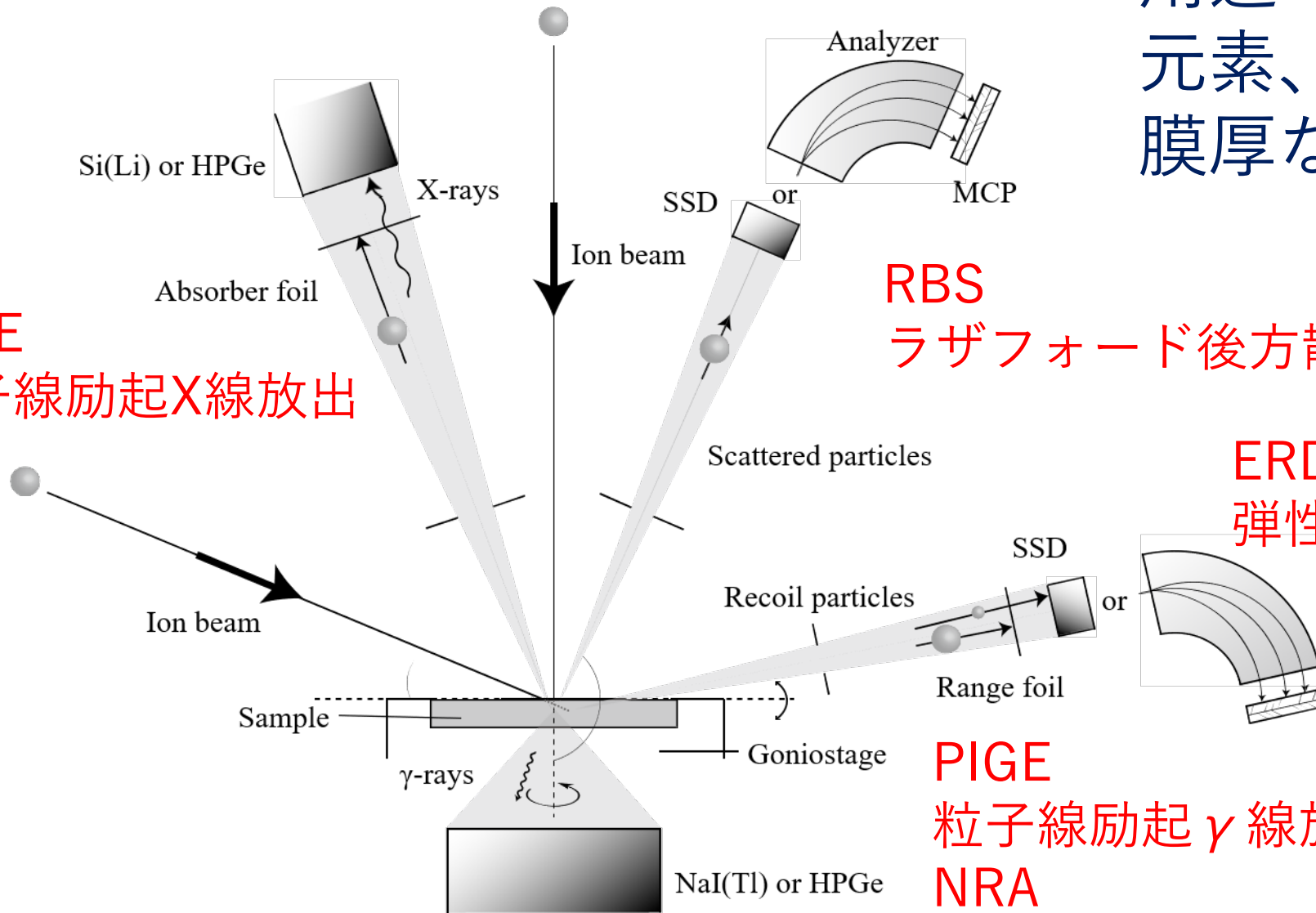
PIXE  
粒子線励起X線放出

RBS  
ラザフォード後方散乱

ERD  
弾性反跳粒子検出

PIGE  
粒子線励起 $\gamma$ 線放出

NRA  
共鳴核反応





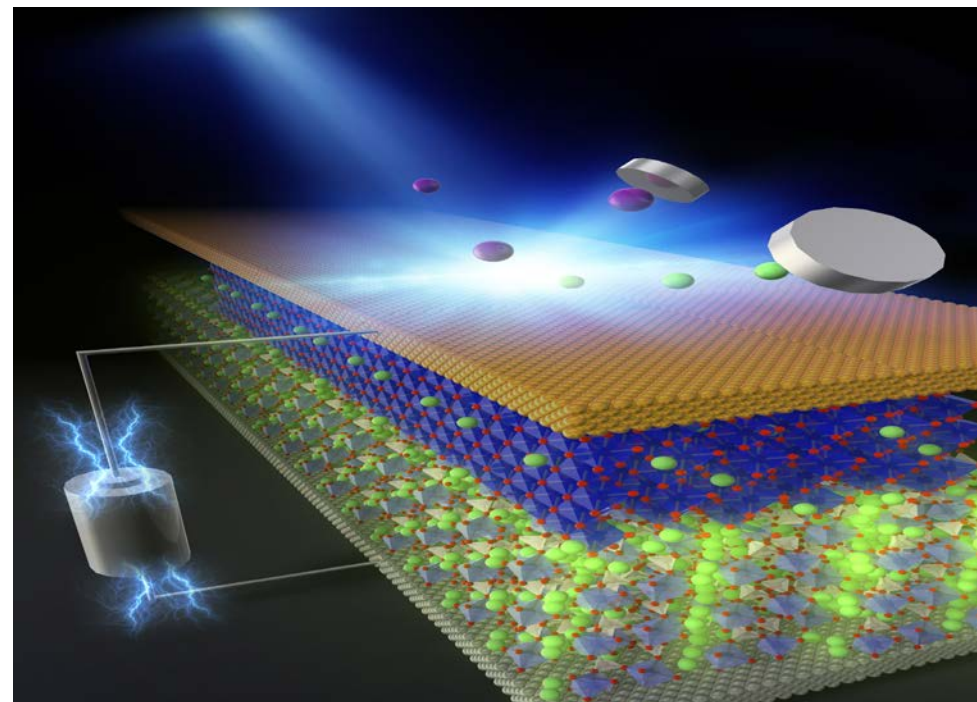
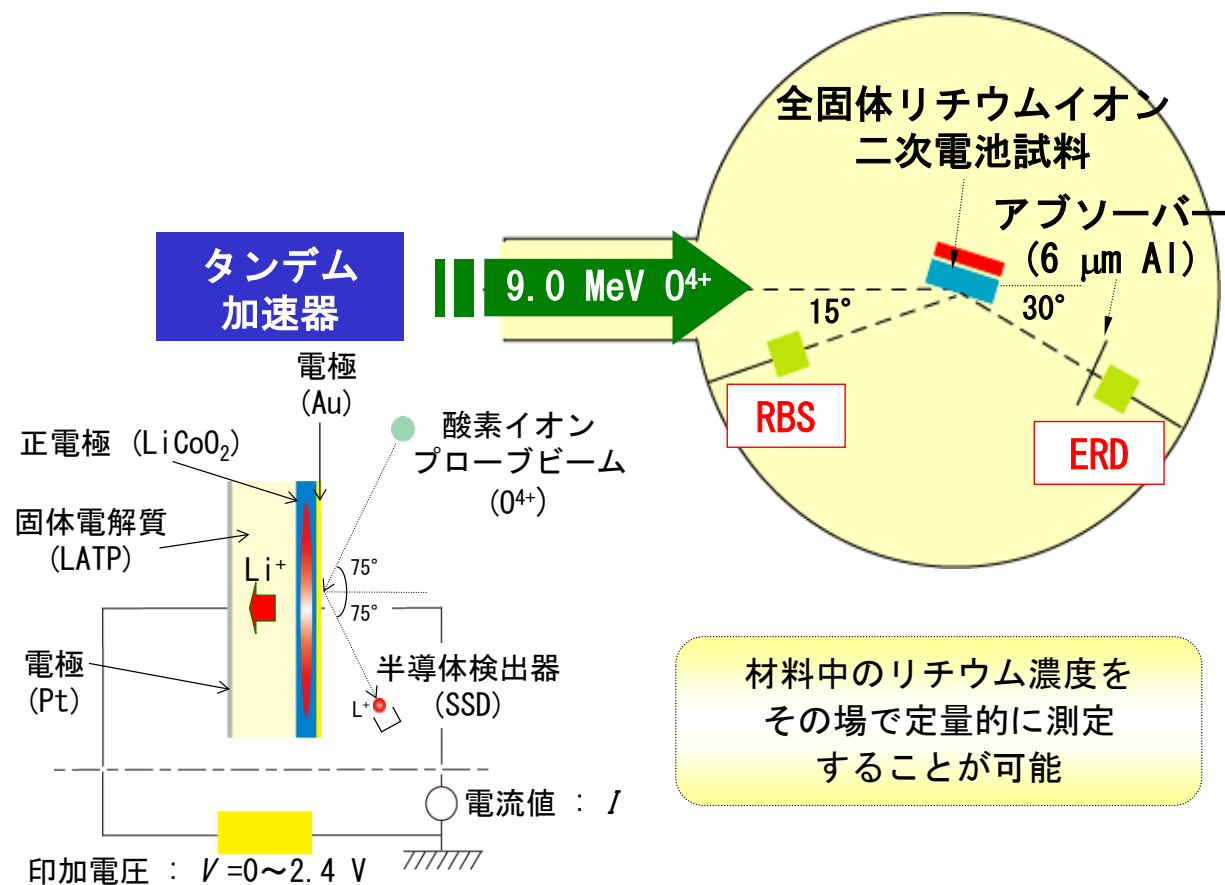
# 反跳粒子検出(ERD)法によるリチウム濃度分析

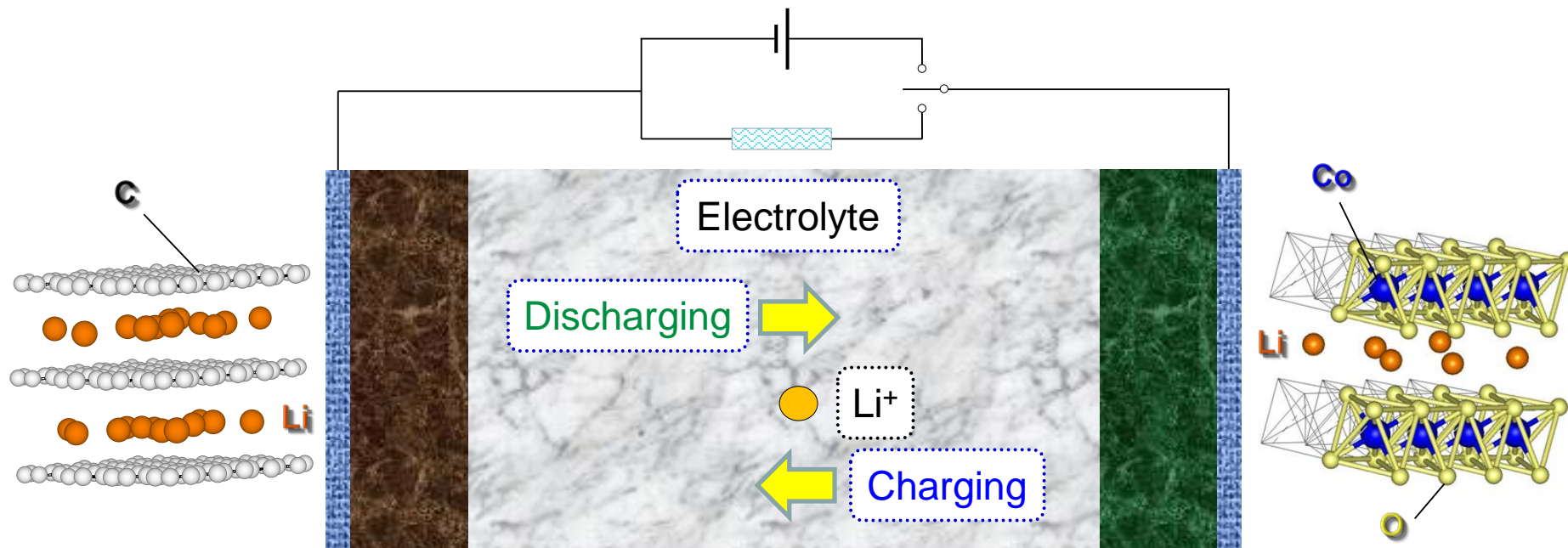


名城大学 土屋 文

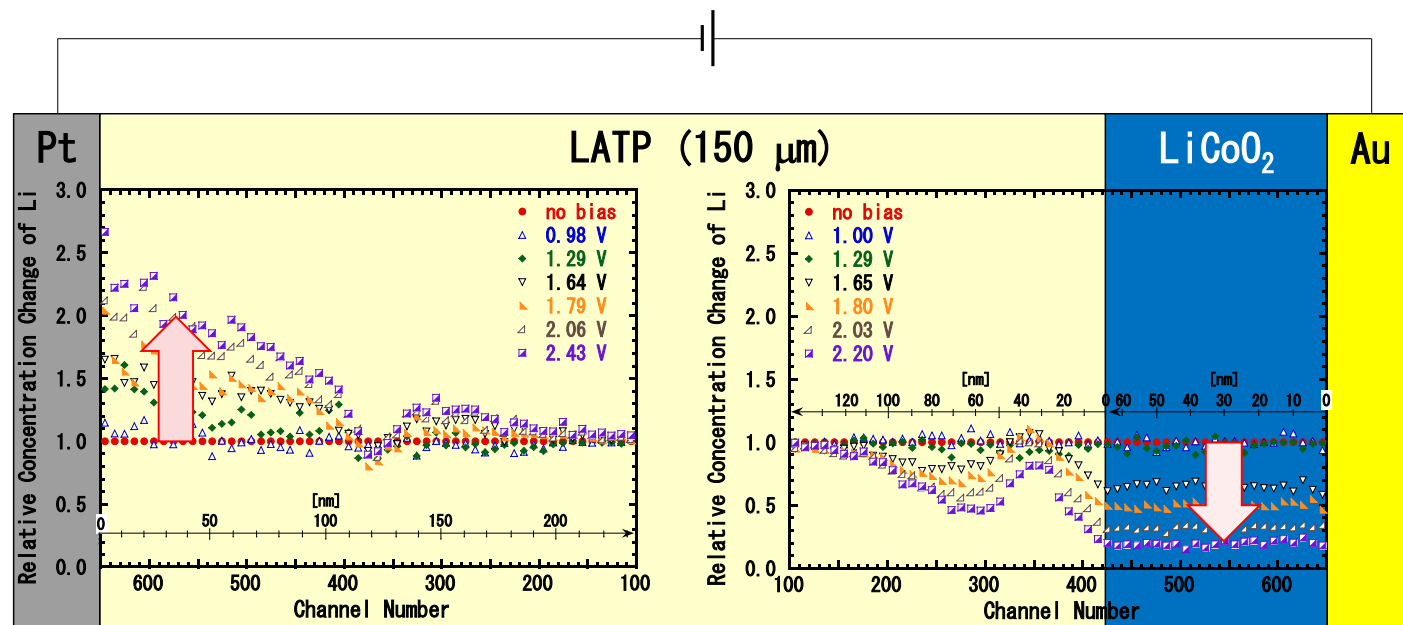
研究目的

材料表面・界面におけるH, He, Li及び水 (H<sub>2</sub>O) の吸収, 貯蔵, 放出現象の解明  
新規な物性値を有するエネルギー材料および環境材料の作製および技術手法の確立





電圧を印加しながら全固体リチウム電池内の $\text{LiCoO}_2$ 正極中の $\text{Li}^+$ イオンが固体電解質へ駆動され、負極に蓄積されることをその場で観測することを可能にした。また、Hが電池内を占有しており、 $\text{Li}^+$ イオンの移動を妨げている可能性があることも判明。



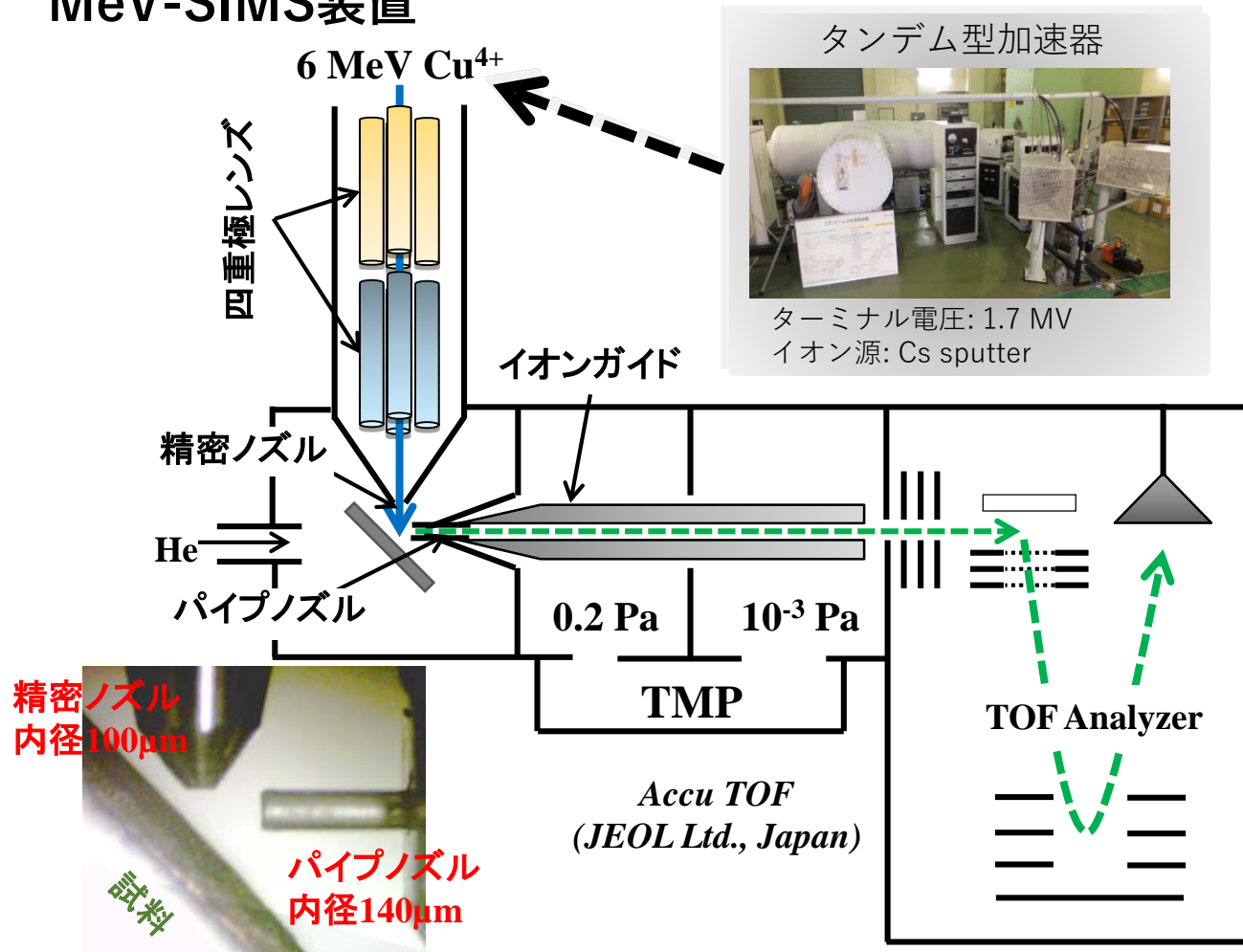
# MeV重イオンを用いた固液界面評価技術の開発

目的: 大気圧下でSIMS測定可能なMeV-SIMSを用いて、LIBの電極-電解液界面に代表される固液界面反応の評価技術の開発を行う

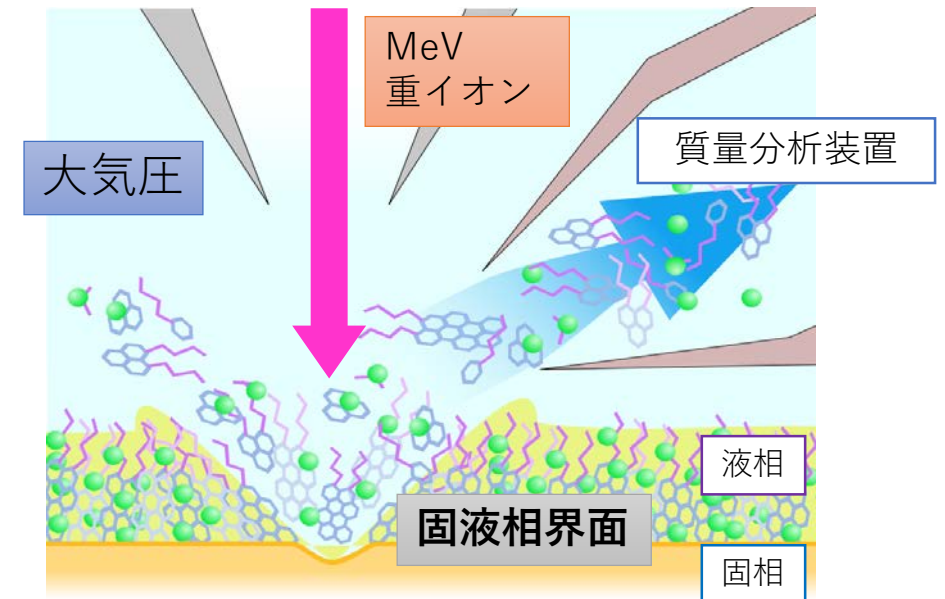


京都大学 瀬木利夫

## MeV-SIMS装置



## MeV-SIMSの特徴



高い二次分子イオン収率

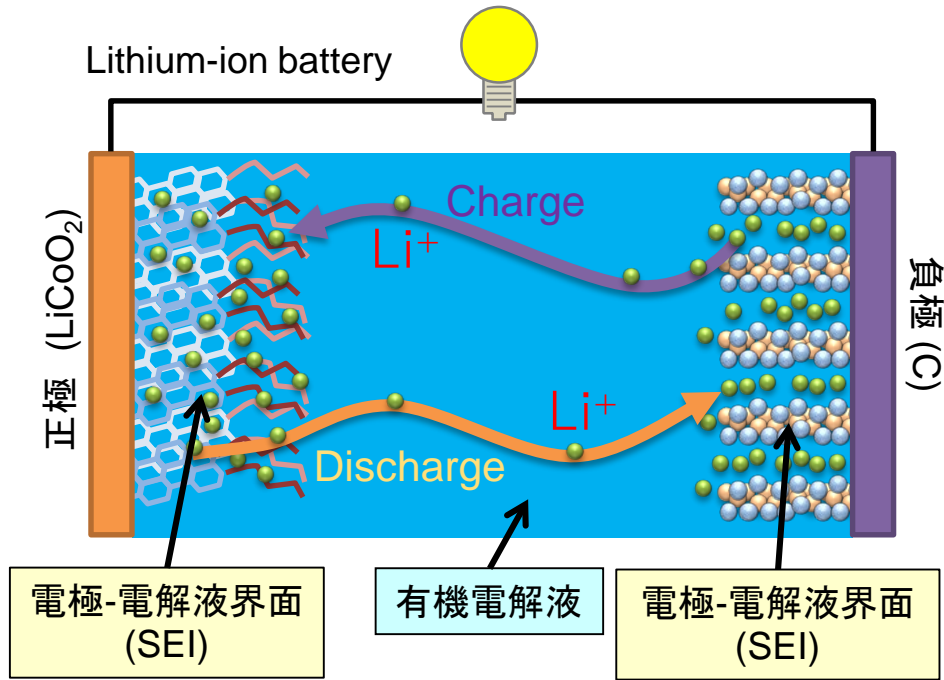
大気圧環境でもビーム特性を維持

液層の蒸発を抑制し、固液界面の分子情報を直接測定可能

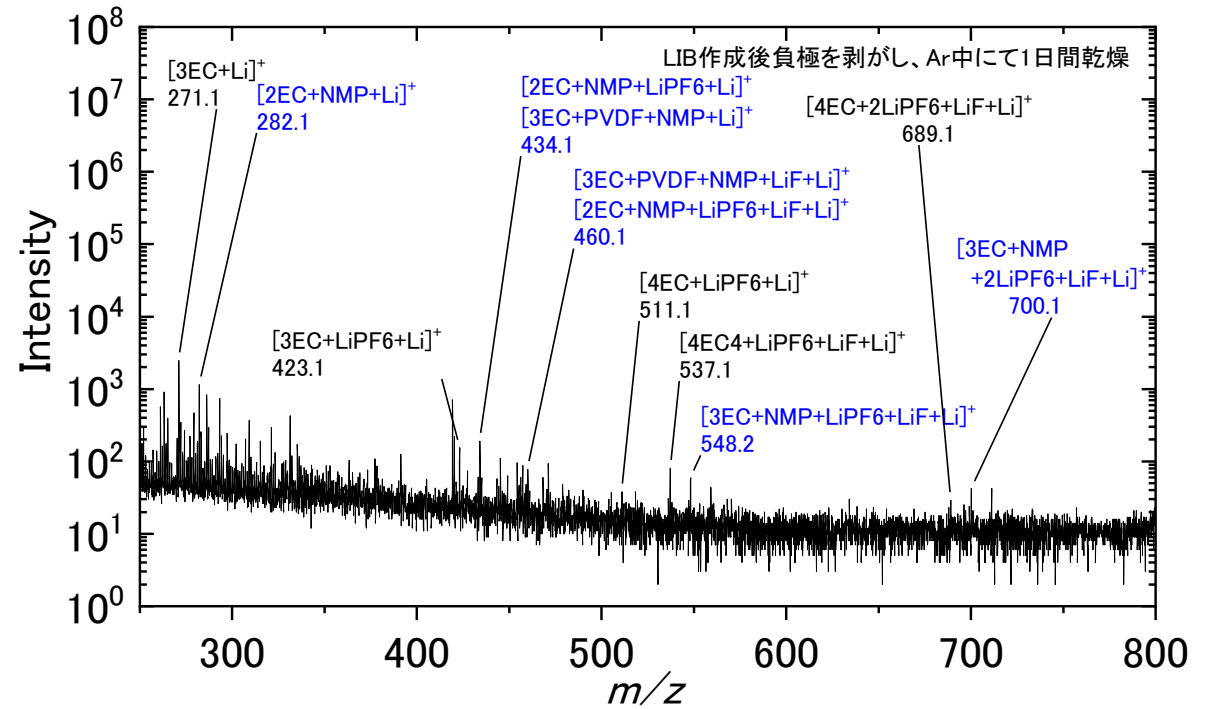
精密ノズルとパイプノズルを用いることにより試料室を大気圧にしても入射ビーム側及び二次イオン分析器側の真空度を保つことができる



# リチウムイオン電池 (LIB) 負極表面のMeV-SIMS測定



電極-電解液界面(SEI)：  
 有機物と無機物の混合物  
 LIB性能の劣化に関係  
 SEIの有機分子の化学情報を測定することにより劣化プロセスの解明が可能

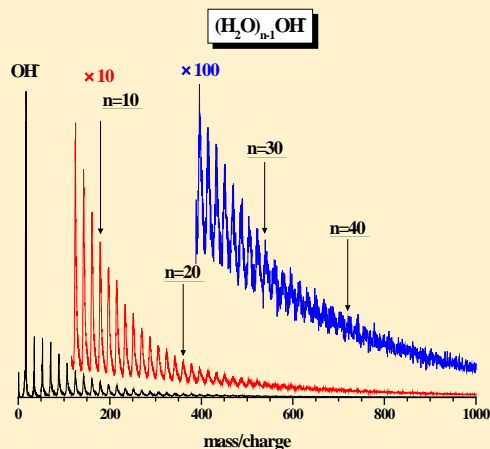


LIBを分解し、負極表面からNMPなどの負極由来の物質を含むピークを観測

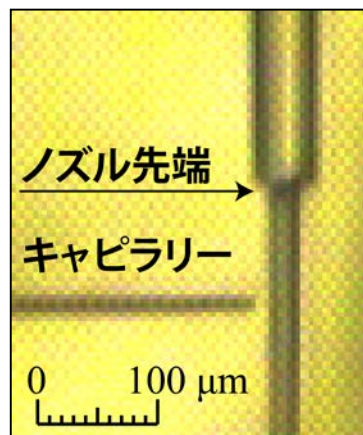
# 液体物質に関する研究

## Secondary ion emission

- J. Chem. Phys. 153 (2020) 224201
- Eur. Phys. J. D 72 (2018) 169
- Nucl. Instrum. Meth. B 424 (2018) 10
- J. Phys. Conf. Ser. 635 (2015) 012021
- J. Chem. Phys. 132 (2010) 144502
- Nucl. Instrum. Meth. B 267 (2009) 908-911

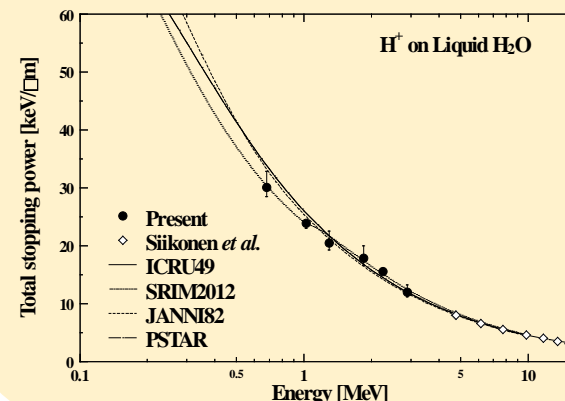


## Micro-jets by M. Faubel

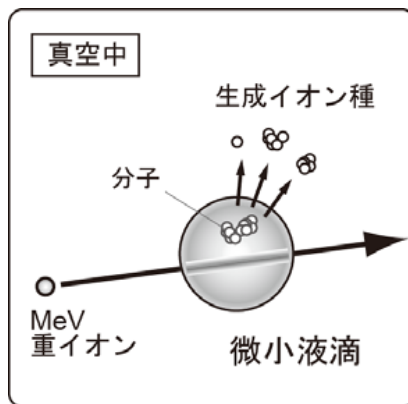


## Stopping power

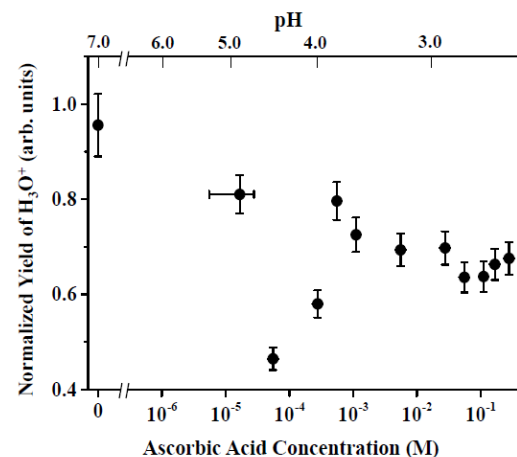
- Nucl. Instrum. Meth. B 269 (2011) 810-812
- Vacuum, 84 (2010) 1002-1004
- Nucl. Instrum. Meth. B 267 (2009) 2667-2670
- Nucl. Instrum. Meth. B 256 (2007) 97-100



## Micro-droplets by Takuya Majima



## Biomolecular damage



- Eur. Phys. J. D 74 (2020) 212
- J. Chem. Phys. 150 (2019) 095102
- J. Chem. Phys. 147 (2017) 223103
- Nucl. Instrum. Meth. B 389-390 (2016) 28
- Nucl. Instrum. Meth. B 365 (2015) 611

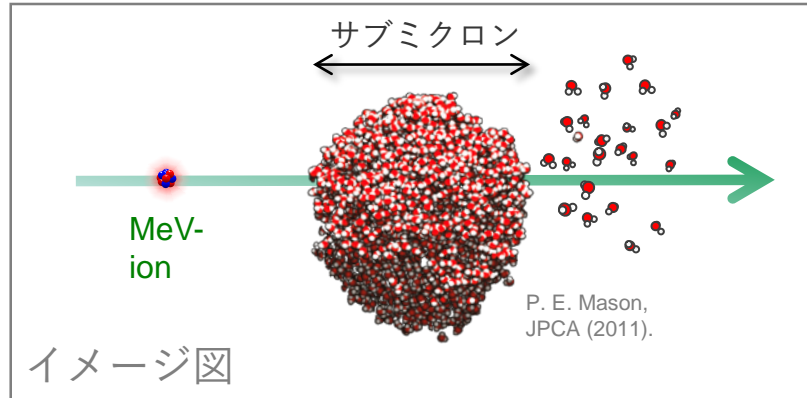
# MeV重イオン衝突による 微小液滴からの二次イオン質量分析



京都大学 間嶋拓也

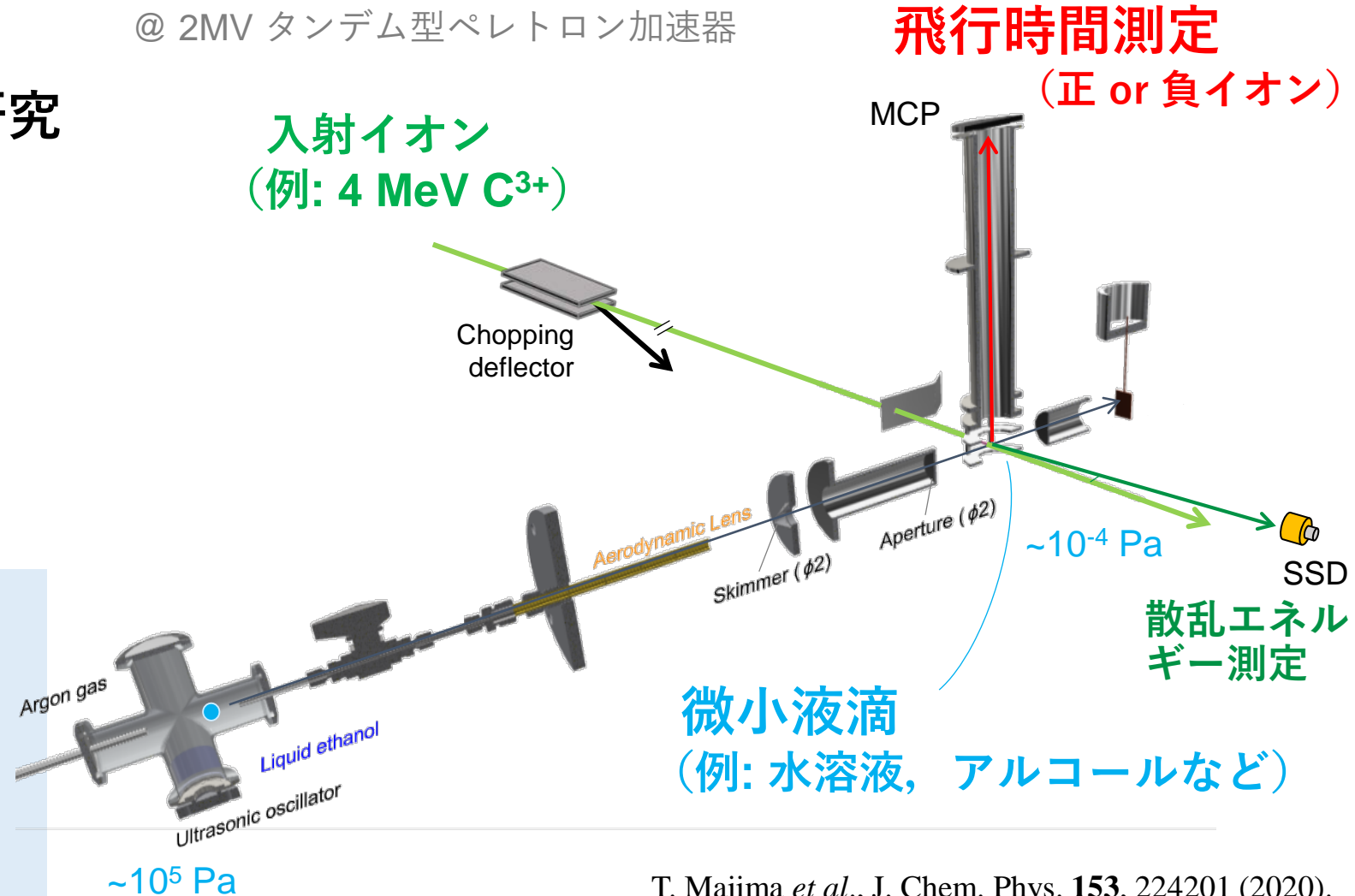
微小液滴を高真空槽に導入

→ 生成イオンの質量分析学的研究



- MeV重イオン照射における複雑な分子反応過程の解明
- ナノサイズ効果の検証  
ナノ領域の反応過程の探索

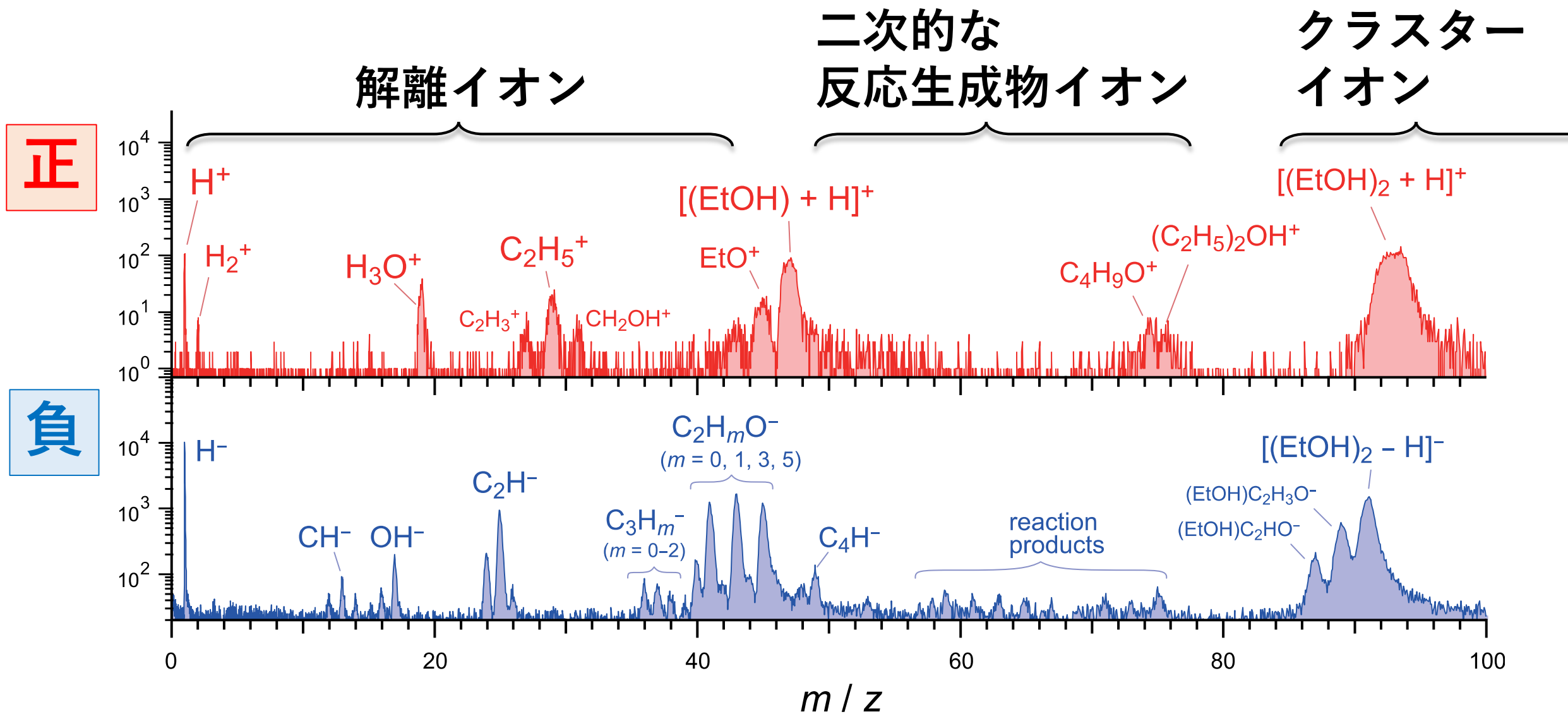
@ 2MV タンデム型ペレトロン加速器



T. Majima *et al.*, J. Chem. Phys. **153**, 224201 (2020).



# 質量スペクトルの測定例：4 MeV $C^{3+} \rightarrow$ エタノール液滴



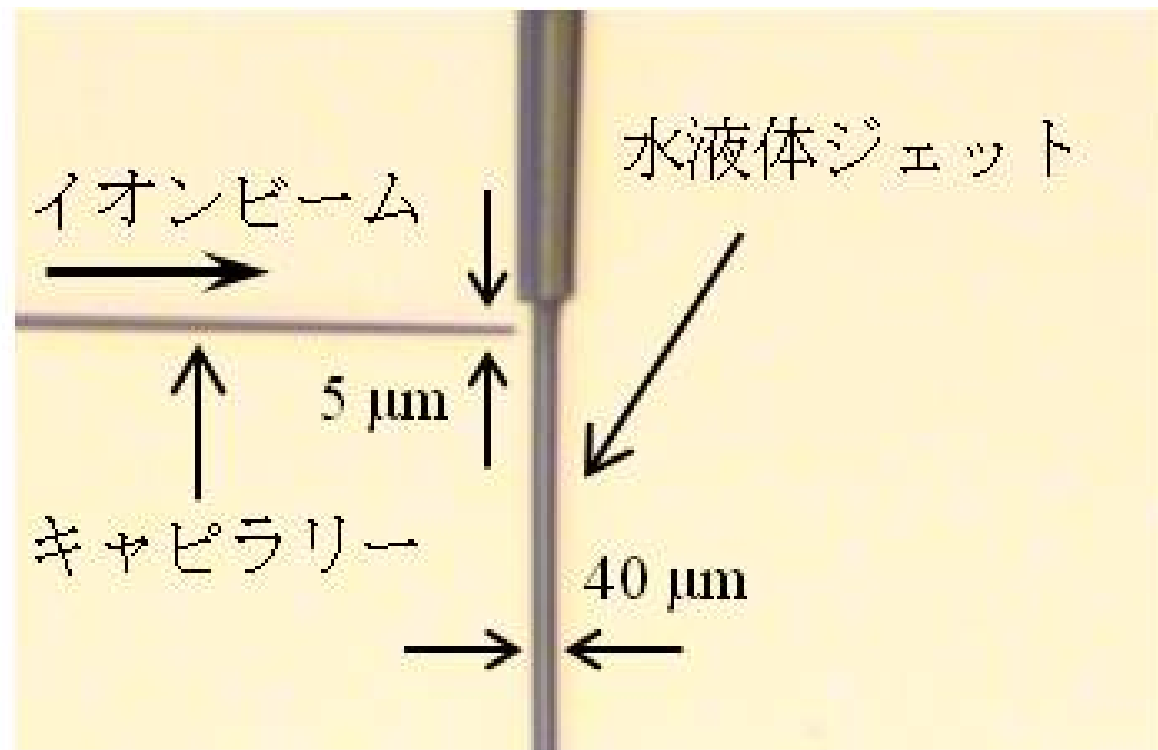
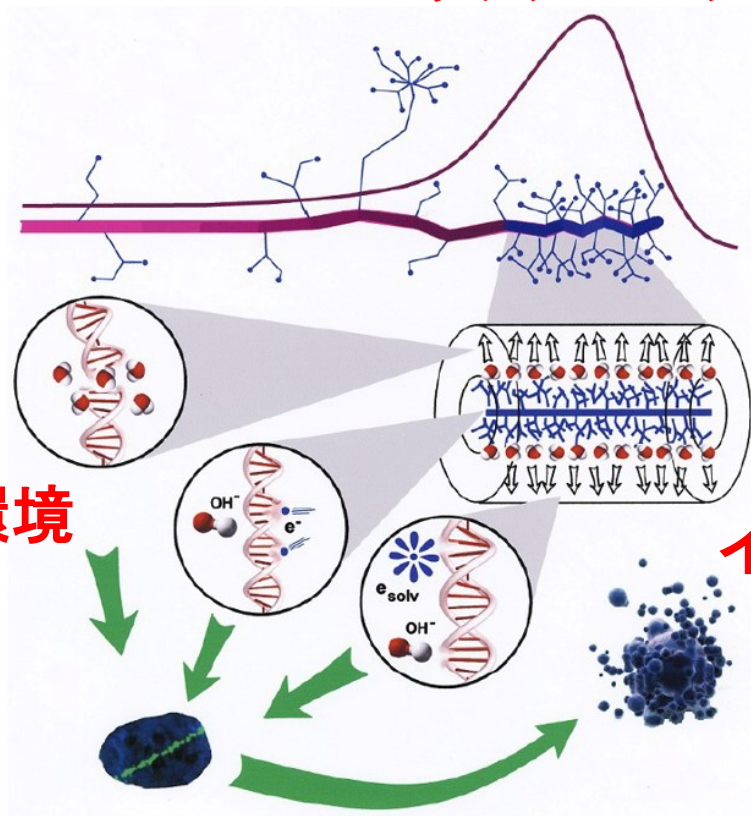
# 水中における生体分子の放射線損傷を駆動する素反応の解明

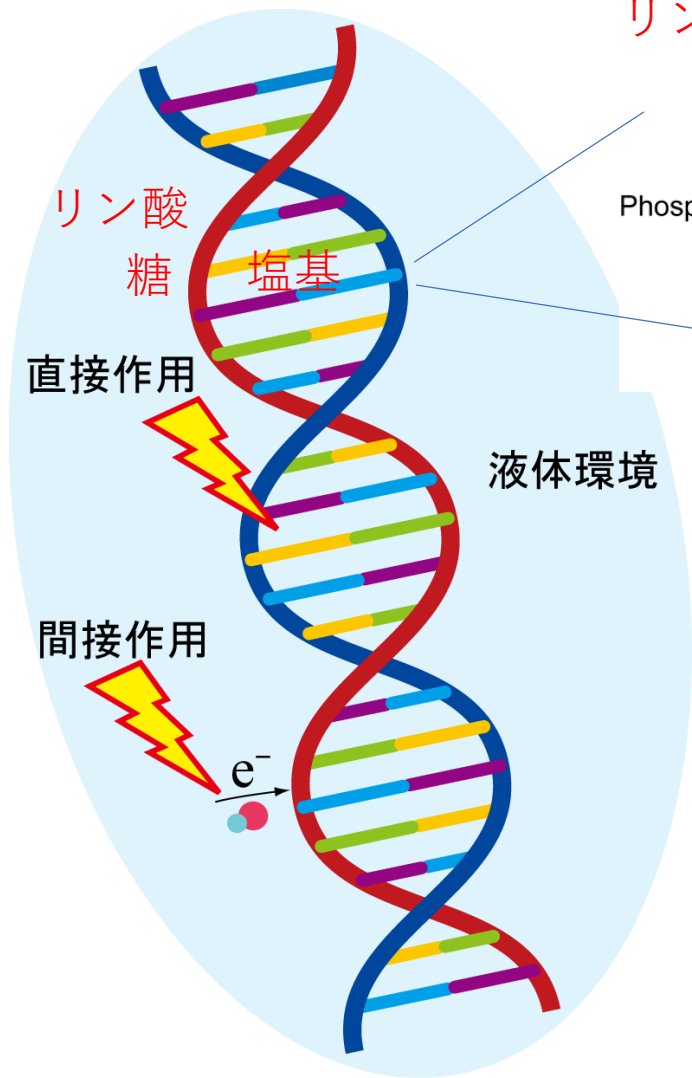
目的: 生体分子の放射線損傷において液体の水の役割を解明する

電子励起  
ブラッグピーク

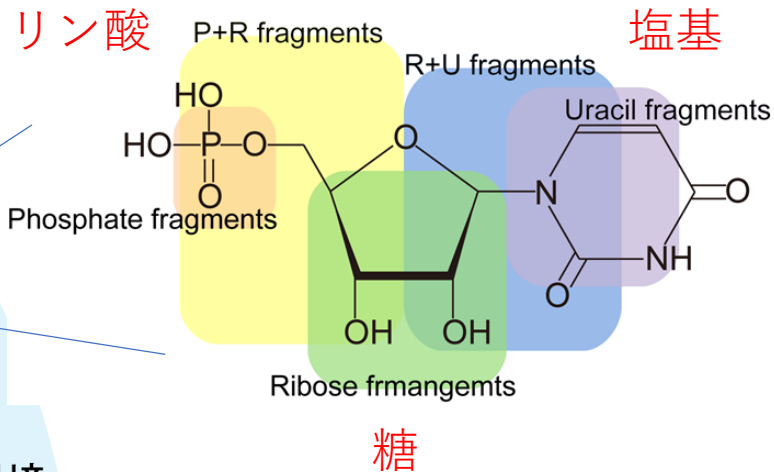
液体ジェット法: 生体の液体環境を模擬

二次イオン質量分析: 生体分子の損傷状態を分子レベルで見る



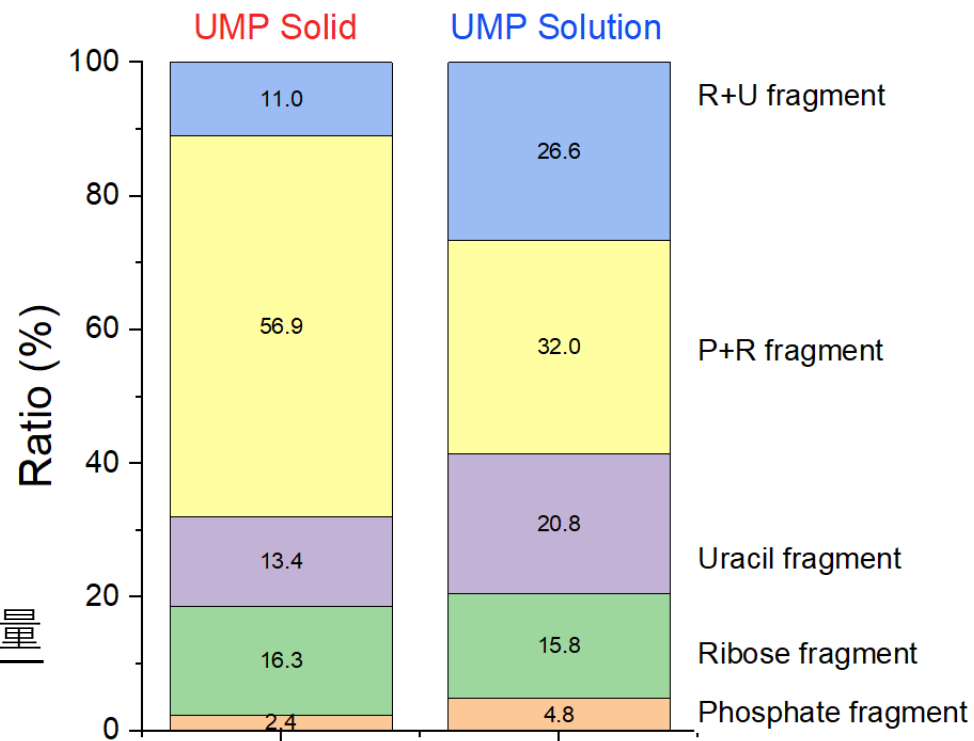


### ヌクレオチド



$$\text{割合} = \frac{\text{各分類の二次イオン収量}}{\text{全二次イオン収量}}$$

### 4 MeV Cイオン照射



- ✓ 固体標的では、リン酸部位とリボース部位の損傷の割合が高い  
**直接作用によるDNA鎖切断**
- ✓ 液体環境では、リボース部位と塩基部位が損傷の割合が増加  
 水の効果・・・**間接作用による塩基部位の損傷**



# まとめと今後の展望

---

施設のホームページ : <http://www.qsec.Kyoto-u.ac.jp/>  
共同利用の連絡先 : [beam@nucleng.kyoto-u.ac.jp](mailto:beam@nucleng.kyoto-u.ac.jp)

コミュニティーとの連携が重要

タンデム加速器及びその周辺技術の研究会

日本物理学会 領域1 原子分子、放射線物理

応用物理学会

薄膜表面物理「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会（今年22回目）

2 放射線, 2.3 加速器質量分析・加速器ビーム分析

7 ビーム応用 イオンビーム一般

日本原子力学会 ビーム科学部会

日本金属学会 原子力材料