

平成23年12月13日

「日本における超高速衝突実験の現状と将来展望」

神戸大学惑星科学研究センター

# 東大HITにおける静電加速器による 微粒子加速実験

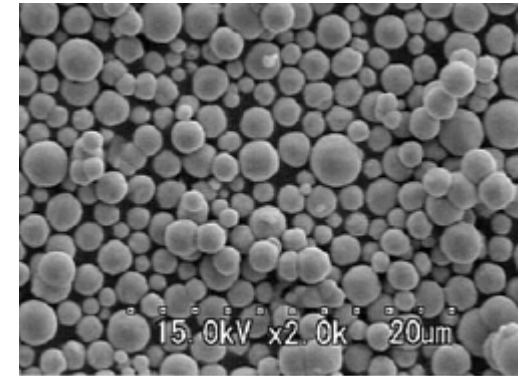
東京大学大学院工学系研究科原子力専攻  
岩井岳夫

# 微粒子加速実験グループ

- 東大  
岩井岳夫、尾亦孝男、  
服部真季、\*濱邊好美
- 京大  
柴田裕実
- ISAS/JAXA  
長谷川直、矢野 創、  
岡本千里、平井隆之、  
\*奥平恭子、藤原顕
- 国立天文台  
佐々木晶
- 東京海洋大  
大橋英雄
- 千葉工大  
小林正規、宮地 孝
- 独協医大  
野上謙一
- 大阪市大  
武智誠次、南 繁行
- FAMサイエンス  
藤井雅之
- JAXA  
藤田和央、小澤宇志
- 東海大  
田中 真
- Max-Planck-Institut  
für Kernphysik  
R. Srama, E. Grün

# 静電加速器方式による 微粒子加速の特徴

- 超高速 (<100km/s)
- 粒子は導電性(表面コーティングも可)に限る
- 粒子径は0.1~20 $\mu$ m程度
- 速度は加速電圧・粒子質量に依存
- 連続的に加速可能(数千、数万発)
- 個々の粒子速度、電荷、通過時刻を計測可能。よって質量は計算可能。密度が既知なら粒子径も評価可能。
- これらは計測器シグナルと1対1対応できる。



# 世界の静電加速器型微粒子加速施設

★Max-Planck-Institute für Kernphysik, ドイツ、ハイデルベルク

2 MV Van de Graaff, since 1962

★University of Kent at Canterbury, 英国、カンタベリー

2 MV Van de Graaff, since 1974

★Concordia College, 米国、ミネソタ州

2 MV Van de Graaff, since early 60's at NASA, then moved

★**東京大学大学院工学系研究科原子力専攻 重照射研究設備、東海村**

**3.75MV** Van de Graaff, since 1998, **イオンビームと兼用**

★University of Colorado, 米国、コロラド州

3 MV Pelletron, since 2011

☆京大工学部2MV Van de Graaff (1990頃まで)

☆Los Alamos National Laboratory

☆Institute of Nuclear Physics, Moscow State University



# HIT 重照射研究設備

High fluence Irradiation facility, the university of Tokyo

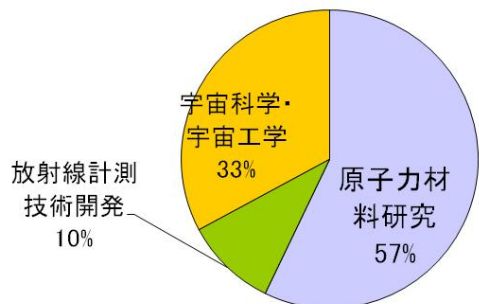
- 1984年東京大学学内共同利用運転開始  
@茨城県東海村
- 核融合炉材料の重照射効果研究をはじめとする加速器を利用した研究強化の目的で設置→以前は学内共同利用、現在は全国共同利用(有料)
- 3.75MV バン・デ・グラーフ  
1MV タンデトロン  
→ 二重イオンビーム照射

	バンデ グラーフ	タンデトロン
最高電圧 (MV)	3.75	1.0
イオン源	RF PIG 微粒子用	Csスパッタ
イオン種	H, D, He, C, O, N 微粒子	H, Al, Fe, Cu, Ni, etc.

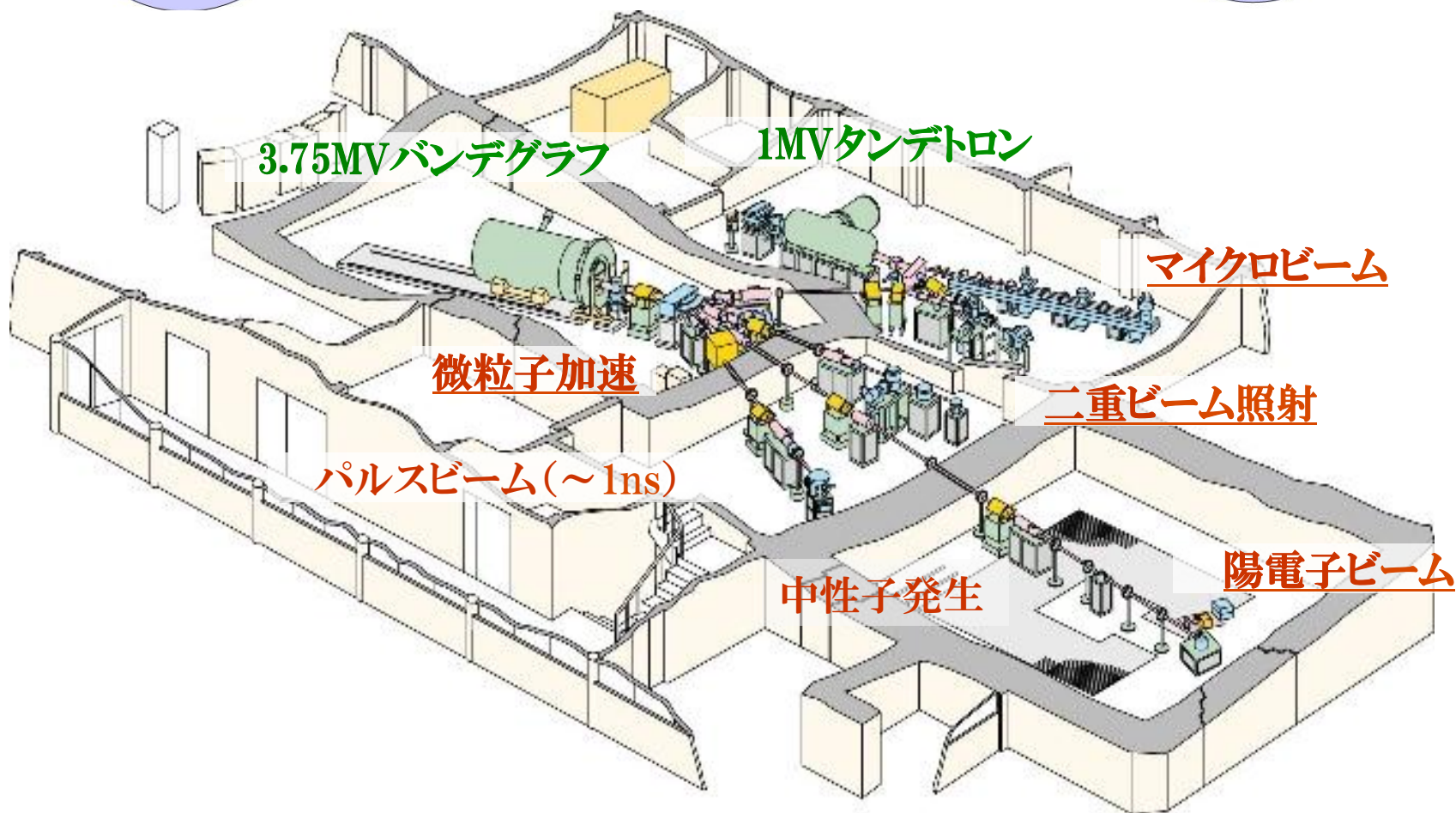
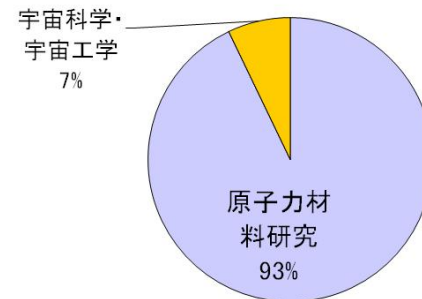


# HITの構成(～2011まで)

バンデグラフ利用内訳(平成22年度上半期配分)



タンデトロン利用内訳(平成22年度上半期配分日数)



# 微粒子イオン源

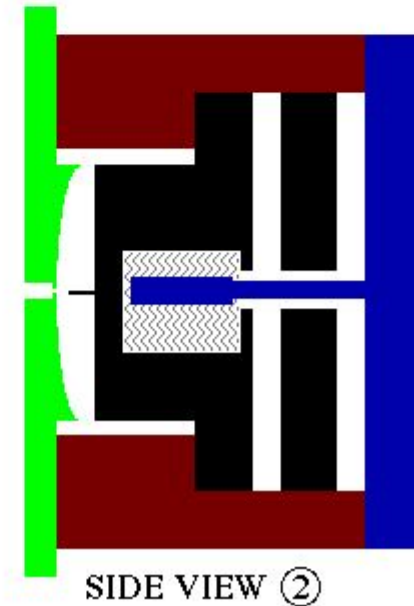
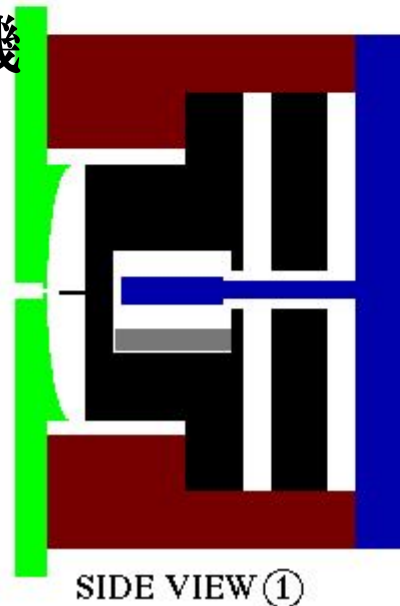
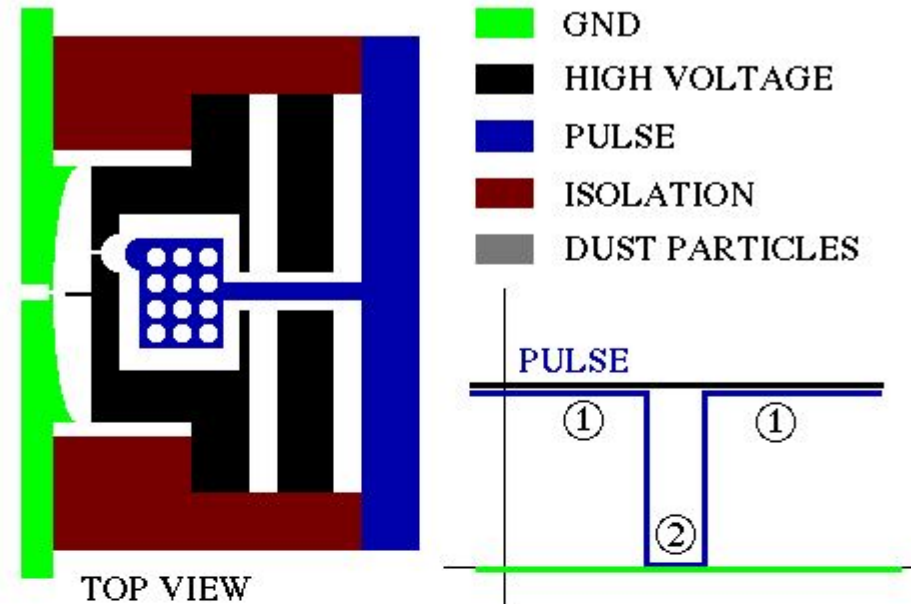
★導電体粒子のみ加速可能

金属粉末、導電体コーティングを施した高分子材料等  
直径1 $\mu$ m程度

★基本原理は各設備共通

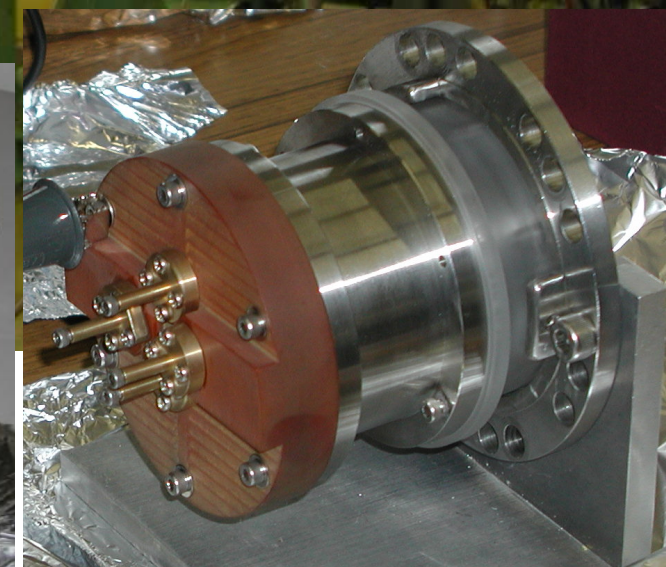
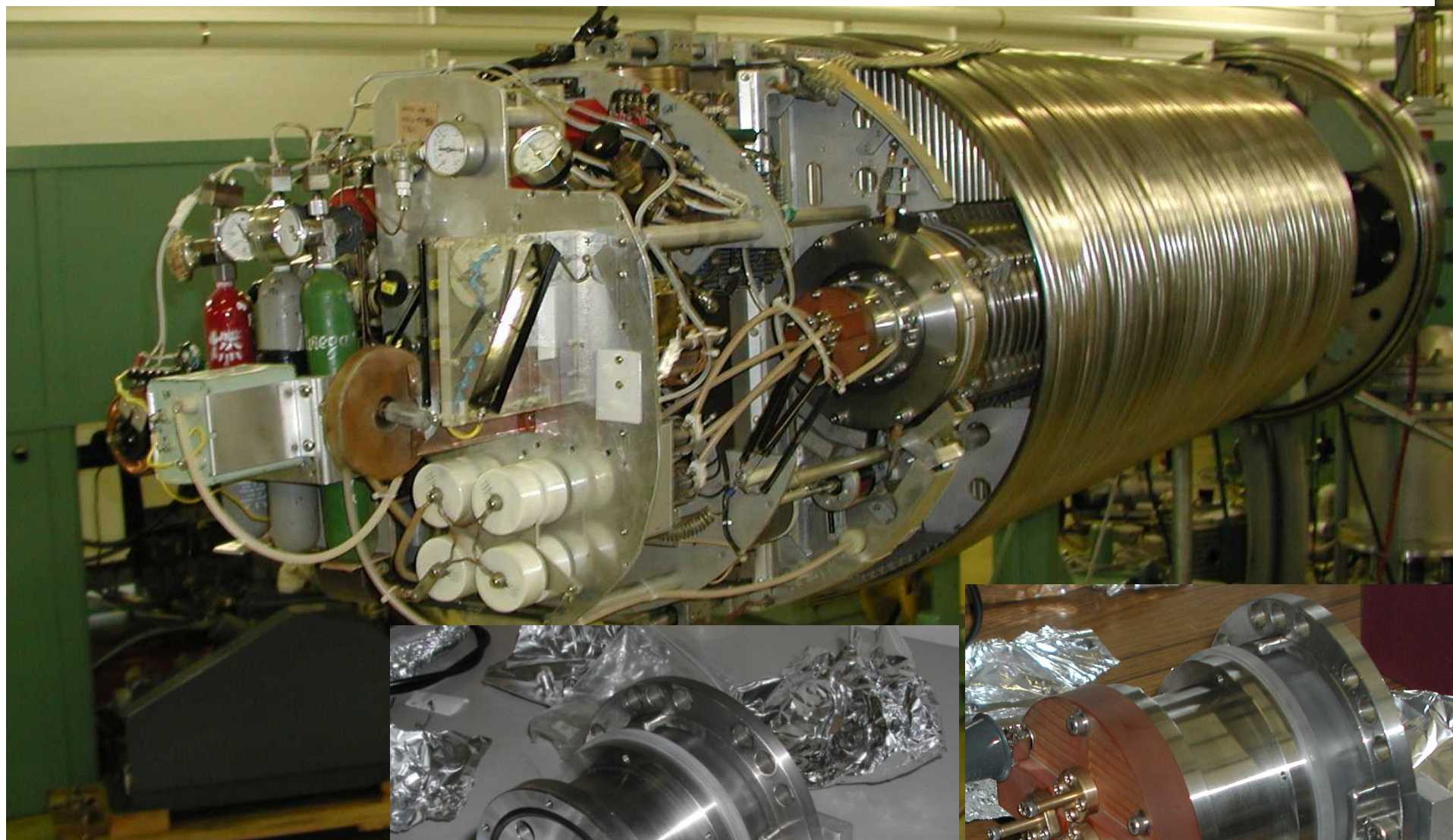
★4種類の粒子の切り替え機構付きに改造  
(設計:長谷川)

## Dust Source



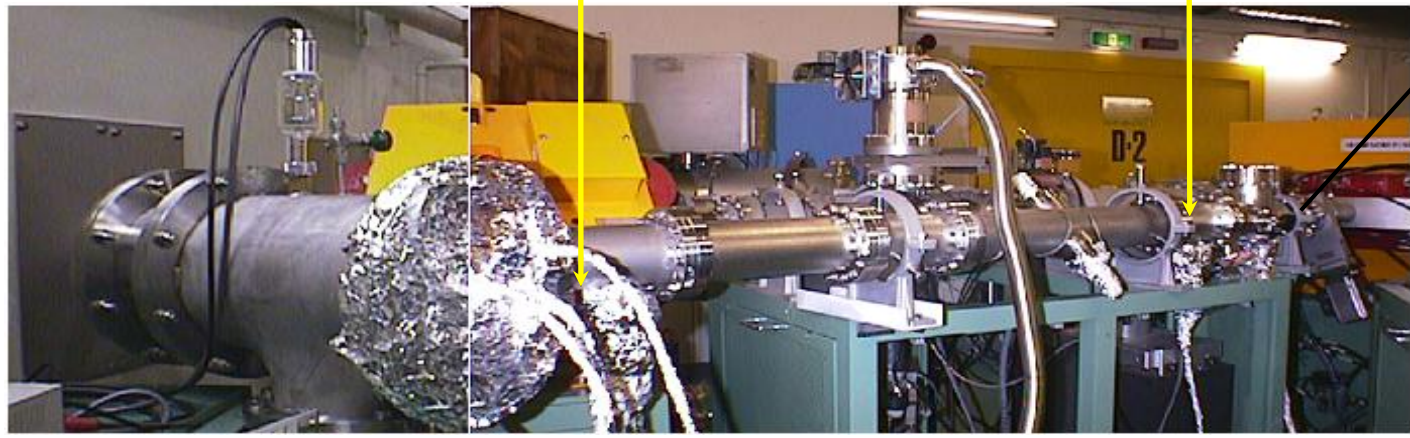
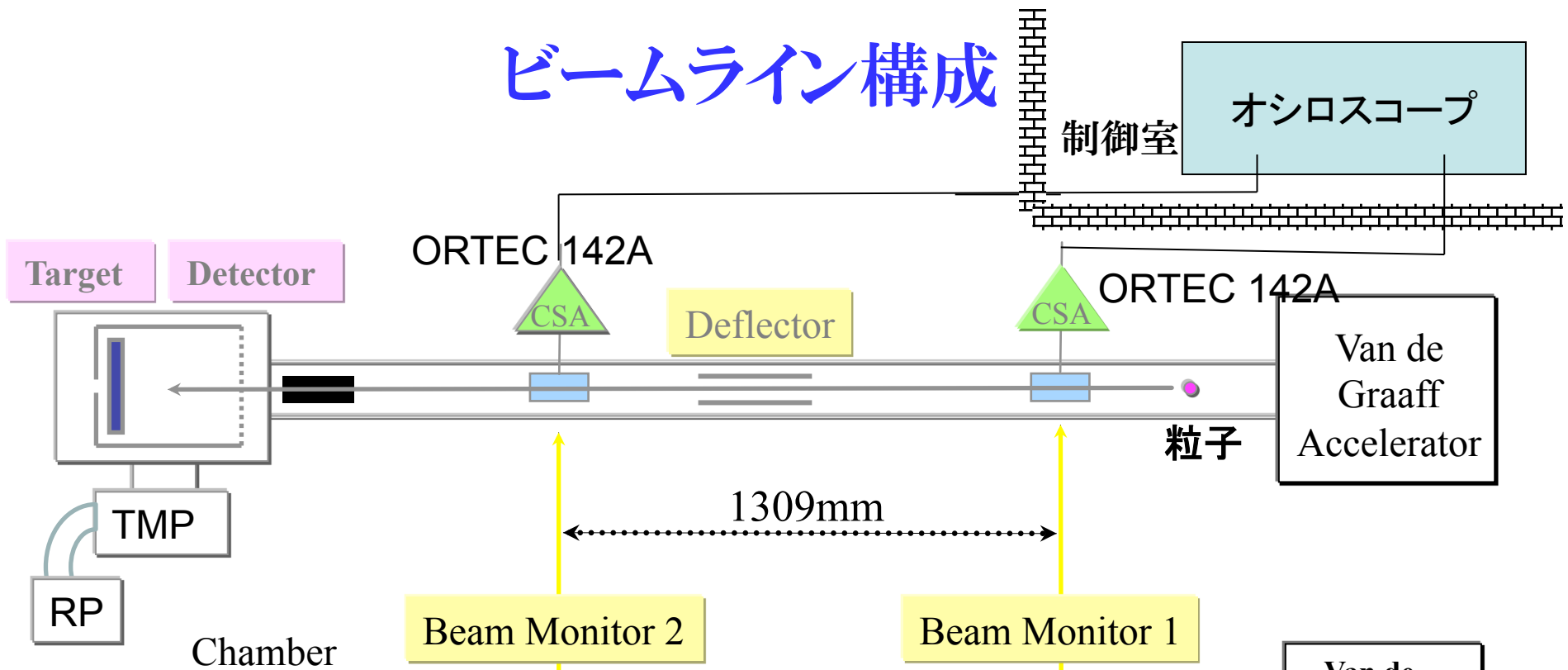


# 微粒子加速モード時のバンデグラーフターミナル部





# ビームライン構成



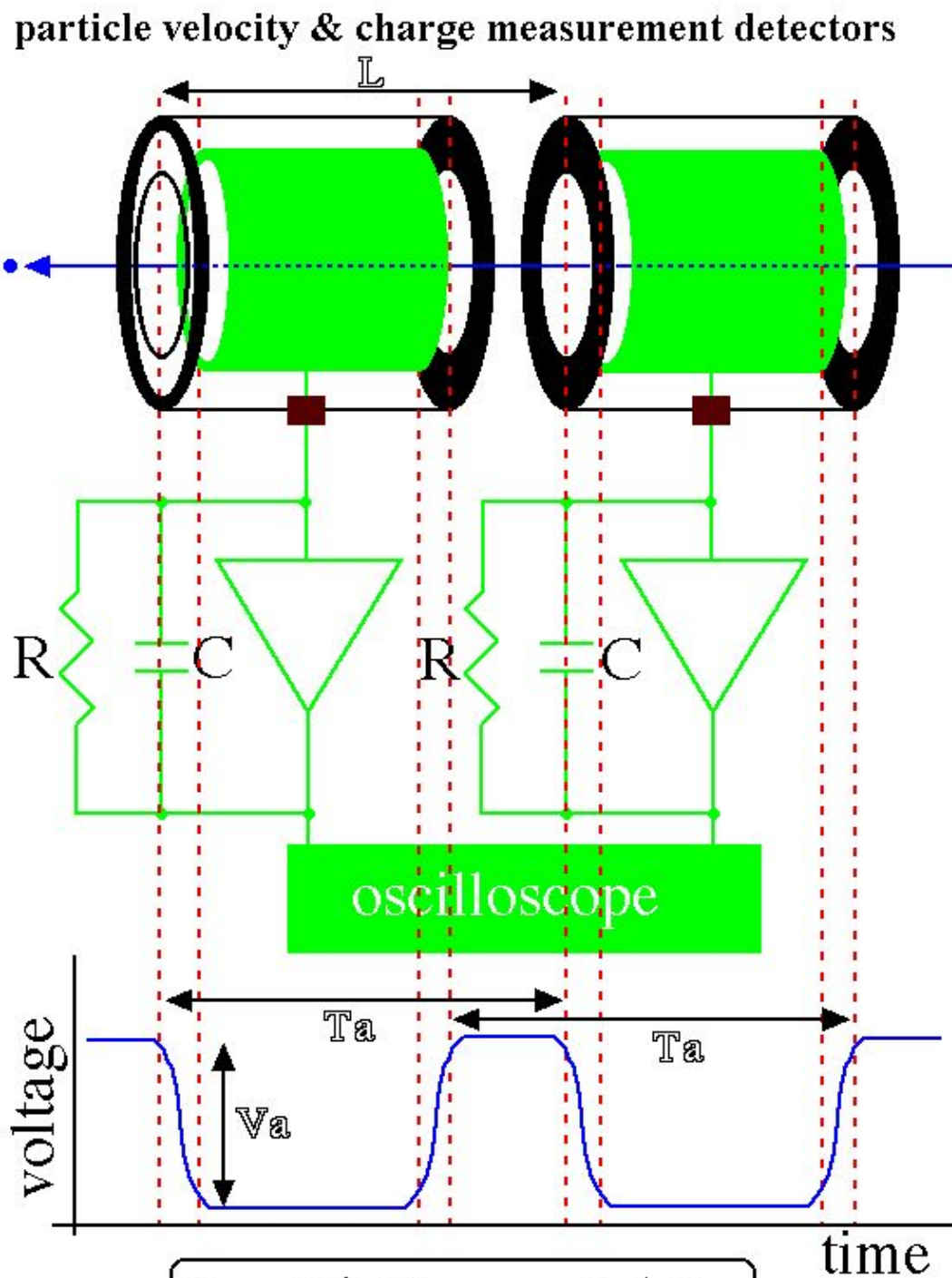
# 微粒子速度・電荷計測の原理

粒子速度  $v = L / T_a$

電荷  $Q = CV_a$

$$\frac{1}{2}mv^2 = QV_{term}$$

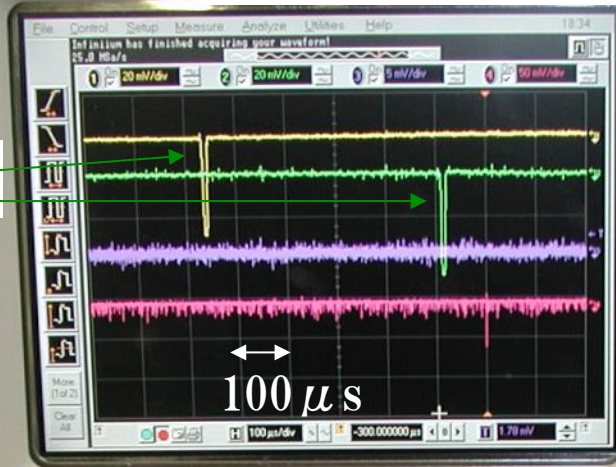
よりmを計算可能





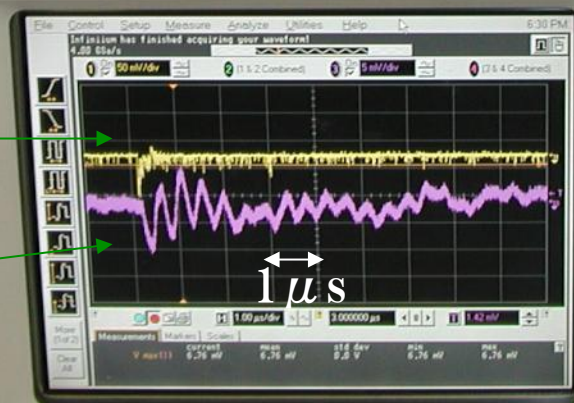
# TOF信号の例

微粒子通過の信号



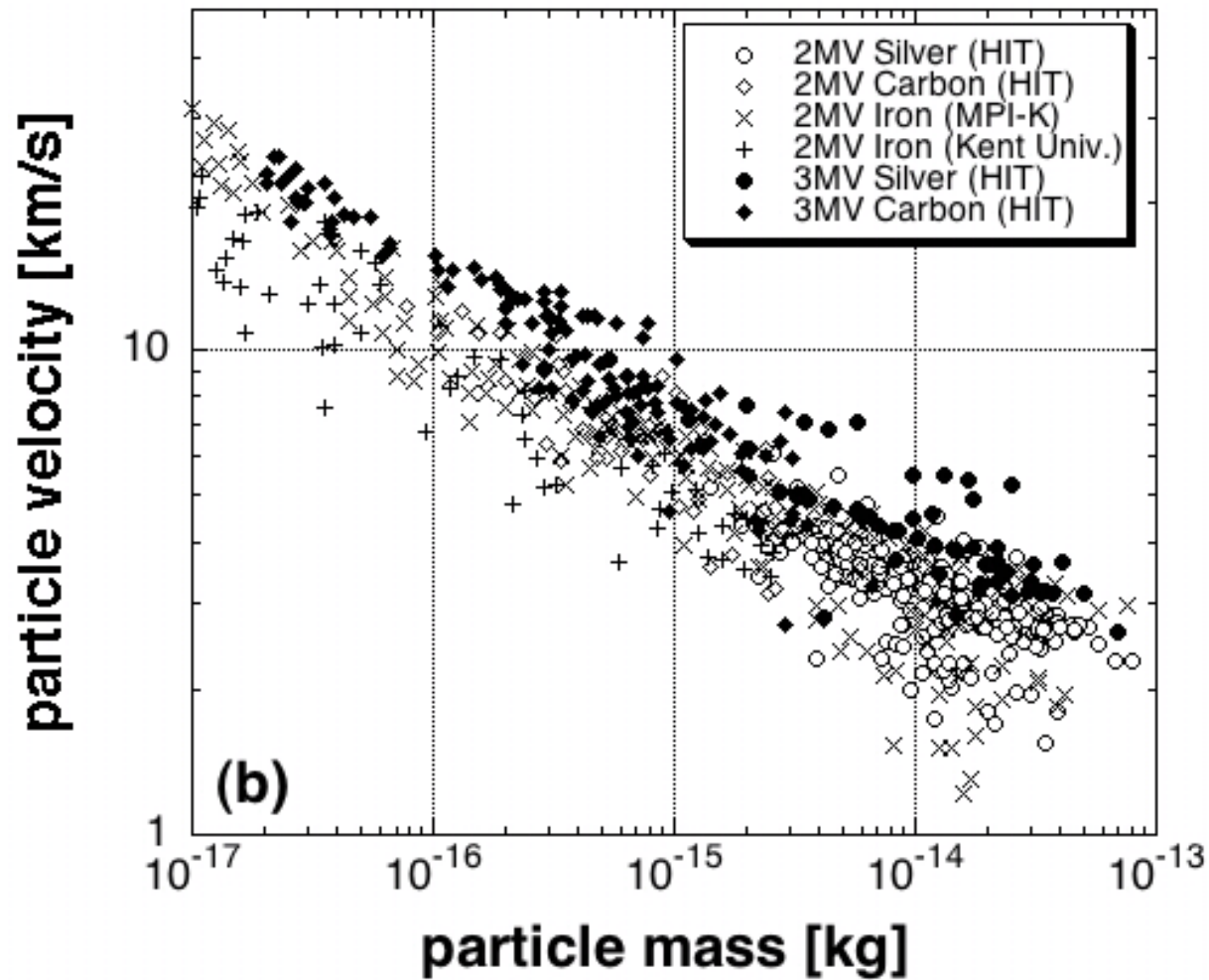
PMT信号

PZT信号



# 加速された微粒子の速度・質量分布

現在、最大で毎秒数十個の微粒子がターゲットに到達する



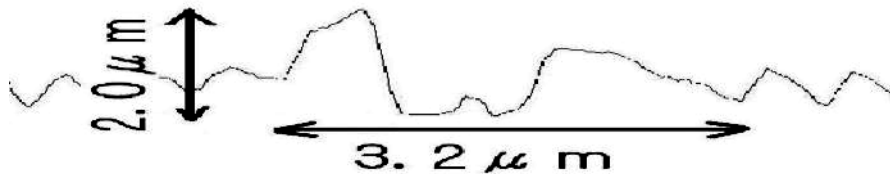
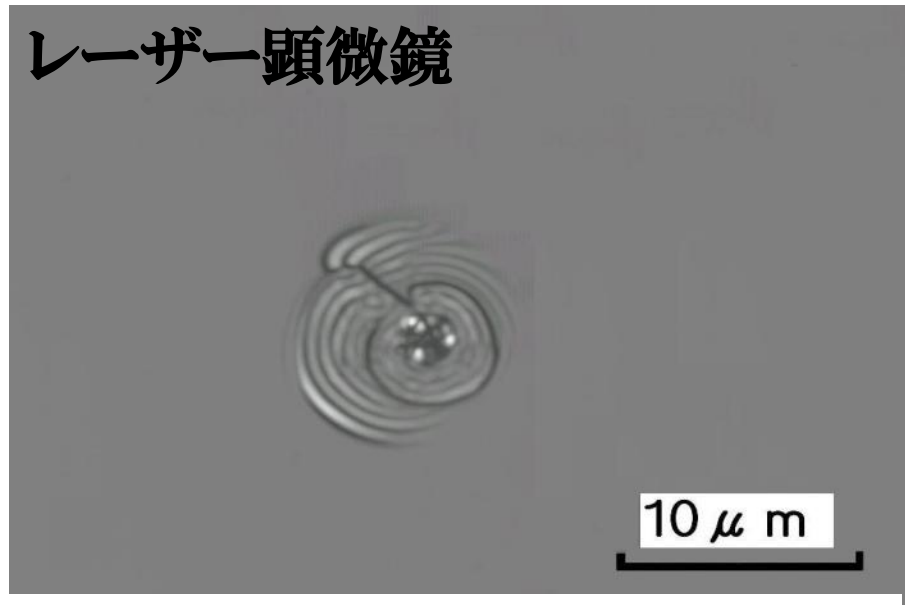
S. Hasegawa et al., International Journal of Impact Engineering 26 (2001) 299-308.



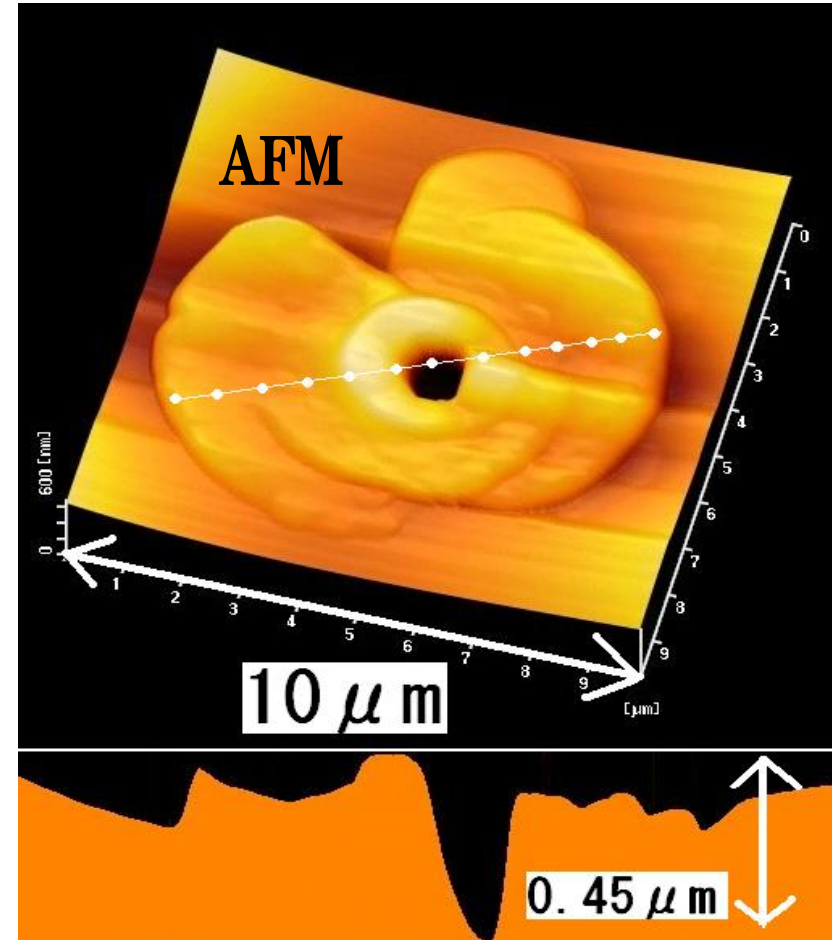
# 加速微粒子によるクレーターへの例

レーザー顕微鏡、AFMによる分析

材料:ホウケイ酸ガラス 照射微粒子:銀



ホウケイ酸ガラスに銀微粒子照射後の衝突痕のレーザー顕微鏡画像と断面図構造



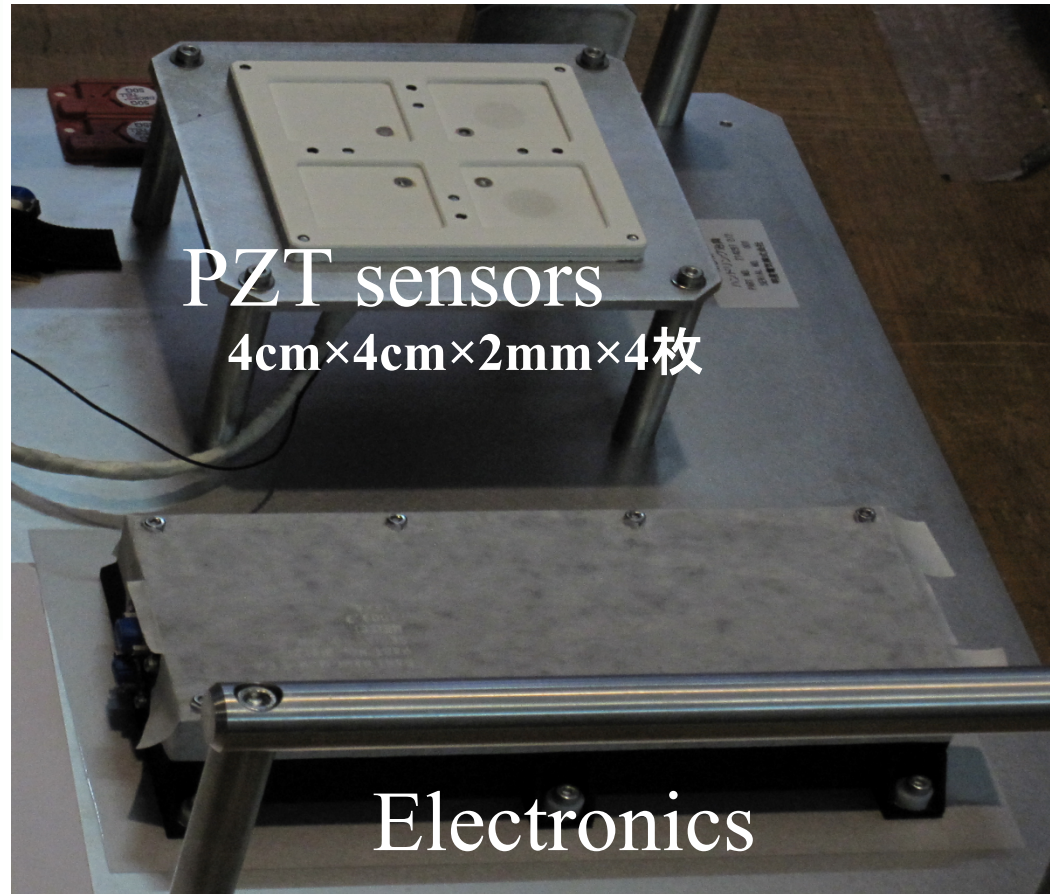
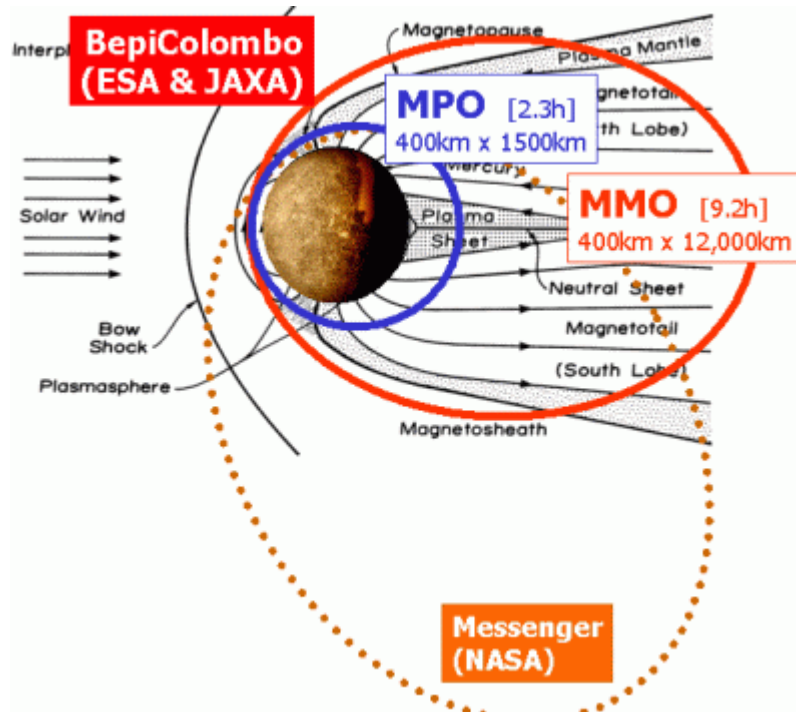
ガラスに銀微粒子照射後の衝突痕のAFM画像とその白線部の断面図構造

# 微粒子加速利用研究グループ

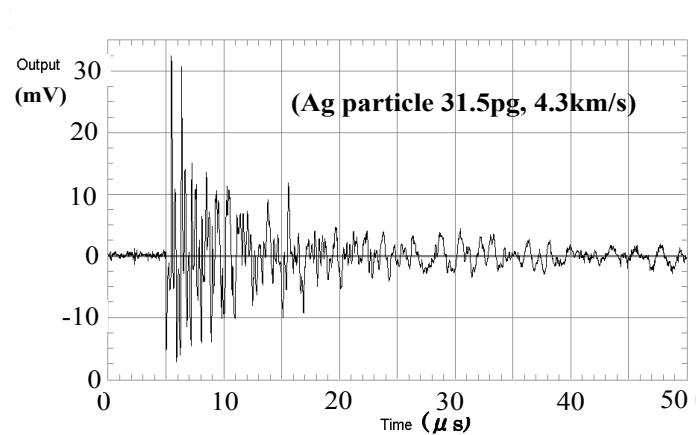
- **水星探査用圧電素子型軽量ダスト計測器開発(MDM)**  
柴田裕実(京大)、野上謙一(獨協医大)、小林正規、宮地 孝(千葉工大)、大橋英雄(東京海洋大)、南 繁行、武智誠次(大阪市大)、佐々木晶(国立天文台)、藤原 顕、矢野 創(ISAS/JAXA)、岩井岳夫(東大)、E. Gruen, R. Srama(MPI-K)、藤井雅之(ファムサイエンス)
- **IKAROS/ALADDIN開発グループ**  
矢野 創(ISAS/JAXA) 他
- **衝突電離型軽量ダスト計測器開発→SELENE-2?**  
大橋英雄(東京海洋大)、佐々木晶(国立天文台)、柴田裕実(京大)、小林正規(千葉工大)、野上謙一(独協医大)、岩井岳夫(東大)
- **TOF型ダスト質量分析器開発**
- **火星無着陸サンプルリターンに向けたダストサンプル模擬実験**  
藤田和央、小澤宇志(JAXA)

# Mercury Dust Monitor (MDM)

- Bepi Colombo水星探査計画で採用(2014年打上)



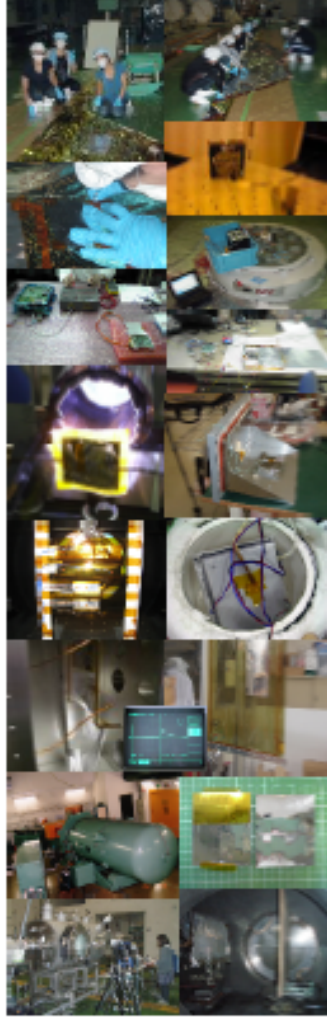
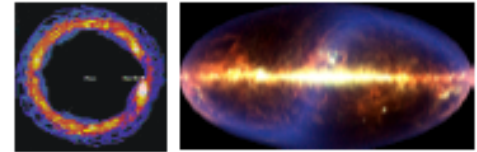
Engineering Model







# ALADDIN: (Arrayed Large-Area Dust Detector for Interplanetary space) IKAROS搭載用大面積薄膜ダスト検出アレイ



### ミッション目標:

- (技術開発) 将来の外惑星探査ミッションに活用する予定の大面積ダスト検出器の深宇宙での実証。光学観測との同時計測も試みる。
- (科学研究) 1~0.7AUにおけるクルージング期間で、過去実績よりも同一観測期間内で一行以上多いダスト衝突を検出し、大型ダストのフラックス精度、時間・空間分解能を向上させ、内惑星領域における、ダスト分布の日心距離依存性を評価する。地球同様の周金星軌道ダストや、未知の彗星トレイルの発見にも挑む。

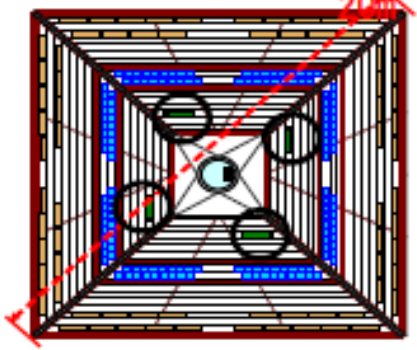
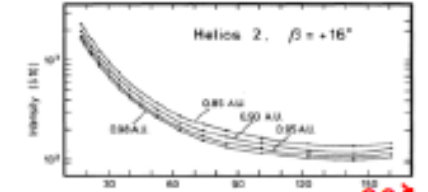
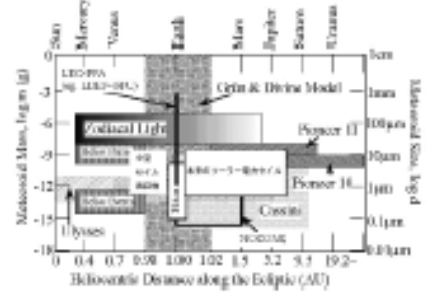
- 打上げ: 2010年5月、種子島よりH-IIAロケットによる
- 搭載探査機: JAXA/JSPECミッション「IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun)」
- 飛行領域: 1AU内惑星領域 (地球~金星軌道領域)
- 構造: 総検出面積0.54m<sup>2</sup>, 8チャンネル,  
9・20ミクロン厚二種PVDF圧電フィルム
- \* 太陽系探査史上最大検出面積を持つ深宇宙用ダスト検出器
- \* 日本初の純国産太陽系探査用ダスト検出器

### IKAROS-ALADDINチーム:

矢野創(PI)、田中真(Co-PI)、岡本千星、長谷川直、田端誠、岩井岳夫、奥平恭子、尾川順子、平井隆之

### Special Thanks to:

(株)クレハ、エルメック電子工業(株)、錦商事(株)、(株)エーディー、藤倉航装(株)、(株)加速器科学研究所、東京大学HIT、東京都立産業技術研究センター駒込支所  
森山信宏、岡野修久、上村文彦、田村敬明、松永慶、須藤隆一、岩田穂、趙孟佑、豊田和弘、尾亦孝男、松井隆雄、岡部和子、上松チサ、小山恵理、坪内美幸、野上隆一、大橋英雄、柴田裕真、佐々木昌、花田俊也、藤井雅之、北澤幸人、松本晴久、中村真季、赤星保浩、八坂智雄、木部勢至朗、藤原順、佐々木進、吉川真、宮地孝、河合秀幸、松浦周二、村上敏夫、米徳大輔、加藤学、三旗裕也、白澤洋次、船瀬龍、遠藤達也、森治、津田雄一、澤田弘康、横田力男、大西晃、Julie Bellerose、川口淳一郎、森本瞳子、SSAT衛星プロジェクトチーム、「かがやき」衛星プロジェクトチーム、Planet-C IR2チーム、ソーラー電力セルWG、東海大学田中研究室の学生の皆様、ISAS川口研究室の学生の皆様、JAXA/ISAS 固体惑星科学研究系の皆様、JAXA/JSPEC研究開発室の皆様、その他ALADDINの研究・開発・製作・試験を公私にわたってご支援下さった全ての皆様





# HITにおける微粒子加速実験の問題点

## 技術面

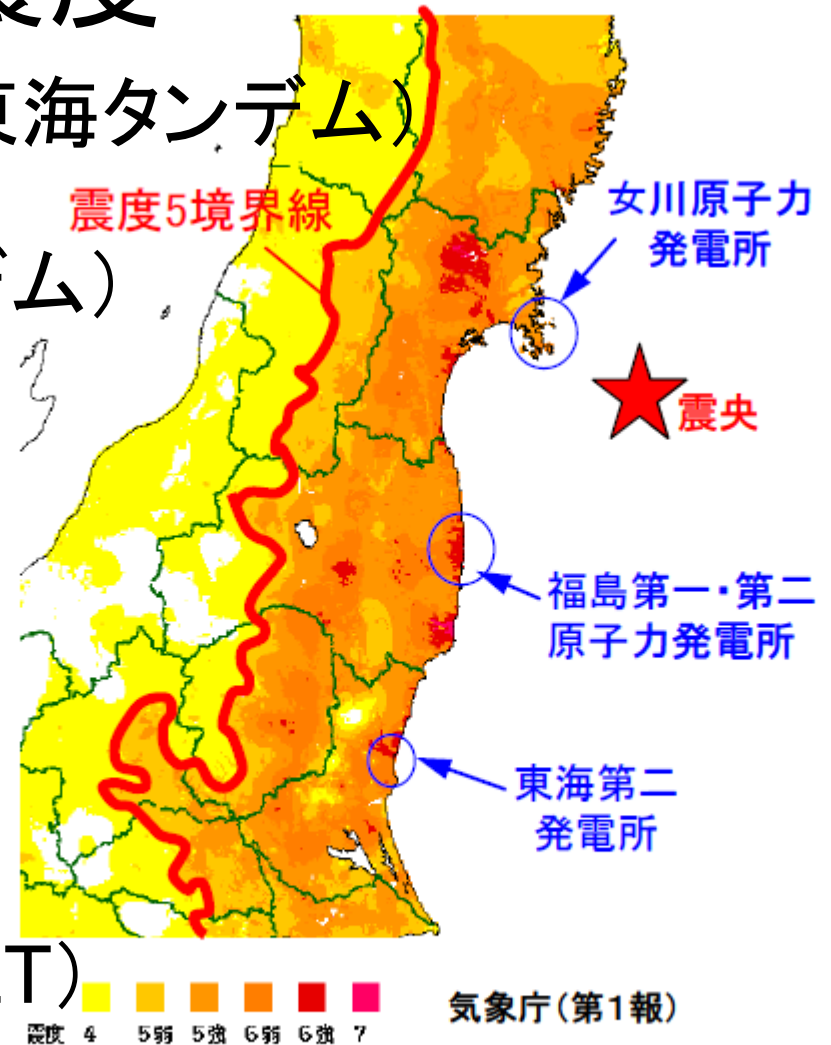
- 電荷の小さい粒子(高速のもの)が雑音に埋もれて検出できていない。
- 加速電圧を1MV以上に上げていくと粒子の頻度が著しく減少する。→改善されたが、なお最適化が必要
- 粒子選別機能の追加

## 運用面

- イオンビームとのハイブリッド運用による時間的制約
- 設備の主目的(原子力関連研究)の利用ではないため、多くのマシンタイムを割けない。年2回⇒年1回に変更(ただし、年あたり週数は変えず、集中的に実験を実施)

# 東日本大震災の影響 各地の震度

- 東海村東海(東大HIT、原研東海タンデム)  
14:46 **6弱**、15:15 **5強**
- つくば市天王台(筑波大タンデム)  
14:46 **6弱**、15:15 **5弱**
- 桐生市黒保根町(パレオラボ)  
14:46 **5弱**、15:15 **4**
- 千葉稲毛区園生町(放医研)  
14:46 **5弱**、15:15 **4**
- 仙台市青葉区雨宮(東北大)  
14:46 **6弱**、15:15 **4**
- 東京都文京区本郷(東大MALT)  
14:46 **5弱**、15:15 **4**



# 東海村での被害

津波到達ライン



原電東海2号炉

東大炉弥生

HIT

原研タンデム

常陸那珂火力発電所排気塔で作業中の4名死亡

地図

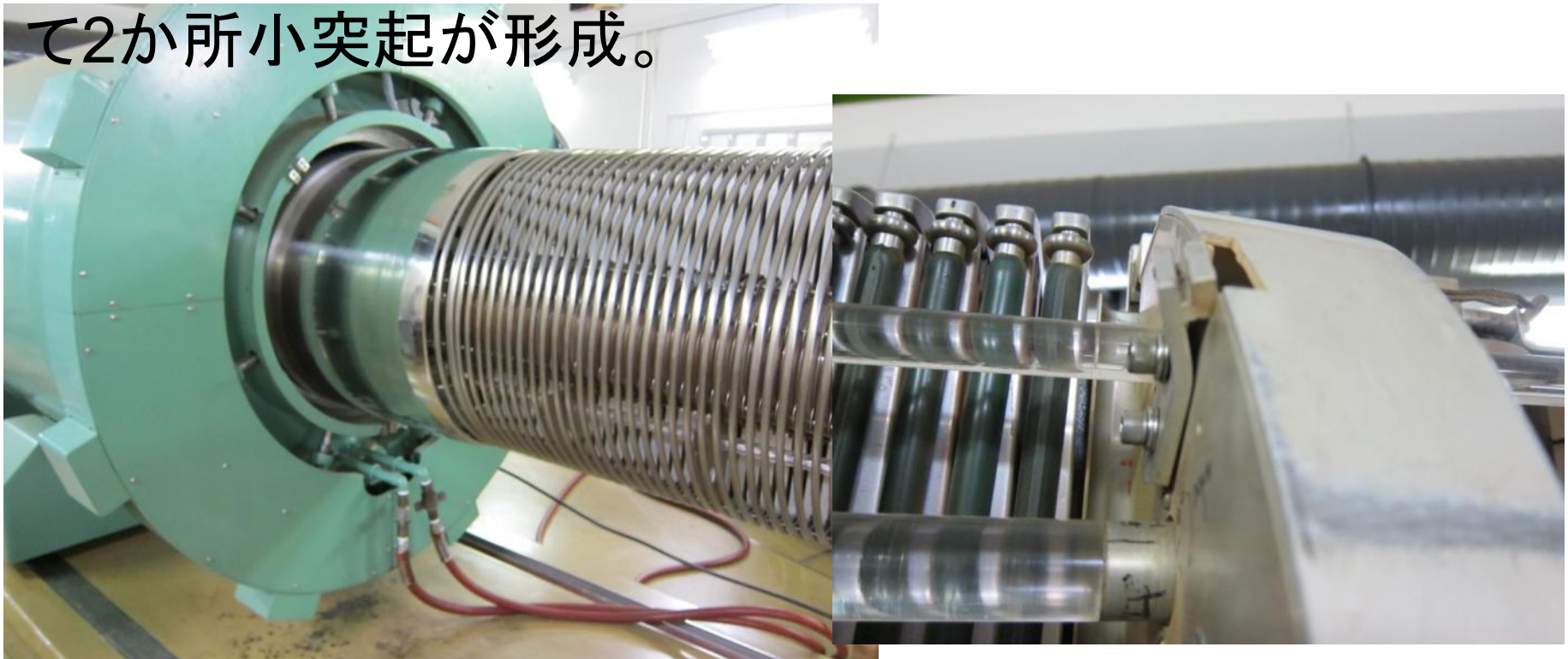
写真

100 m  
200 フィート



## 3.75MVバンデグラーフの被害

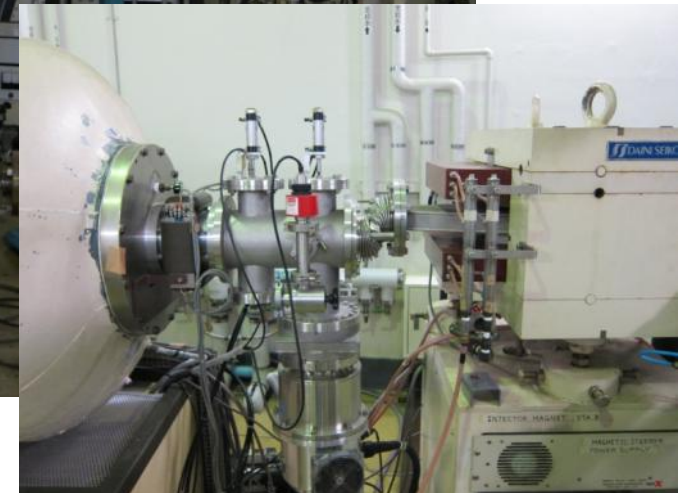
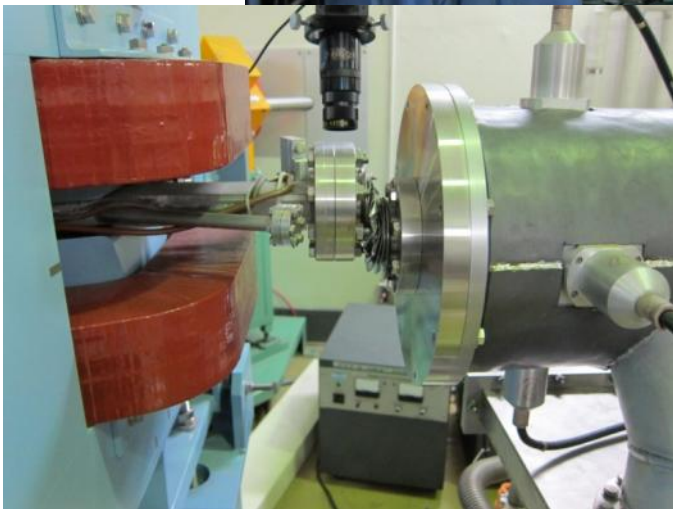
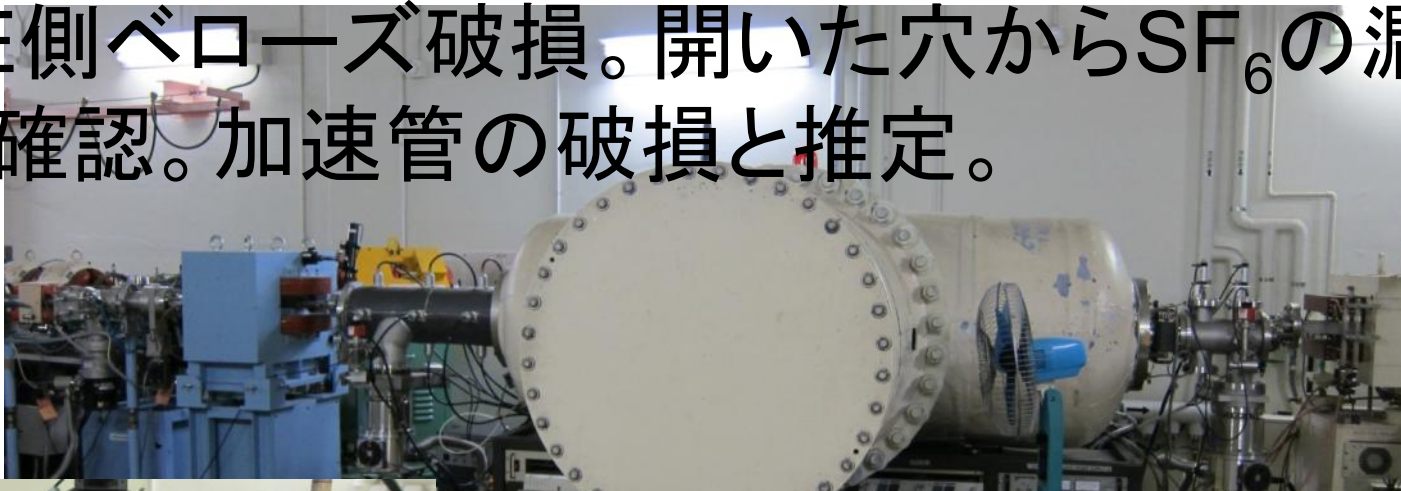
- 地震発生時2MVで運転中（JAXAの微粒子加速実験）
- タンクを開けるとシェルが固定具から外れ、ターミナルに引っかかる感じになっていた。ターミナル先端部の強い揺れによってシェルが固定具を曲げつつ離脱したと推測。
- シェル内部がターミナルと衝突したことにより外側へ向けて2か所小突起が形成。





# 1MVタンデトロン

- T型タンクが大きく揺さぶられ、2か所のタンク下部支柱より滑り落ち、約5cm沈降
- HE側ベローズ破損。開いた穴からSF<sub>6</sub>の漏れ確認。加速管の破損と推定。

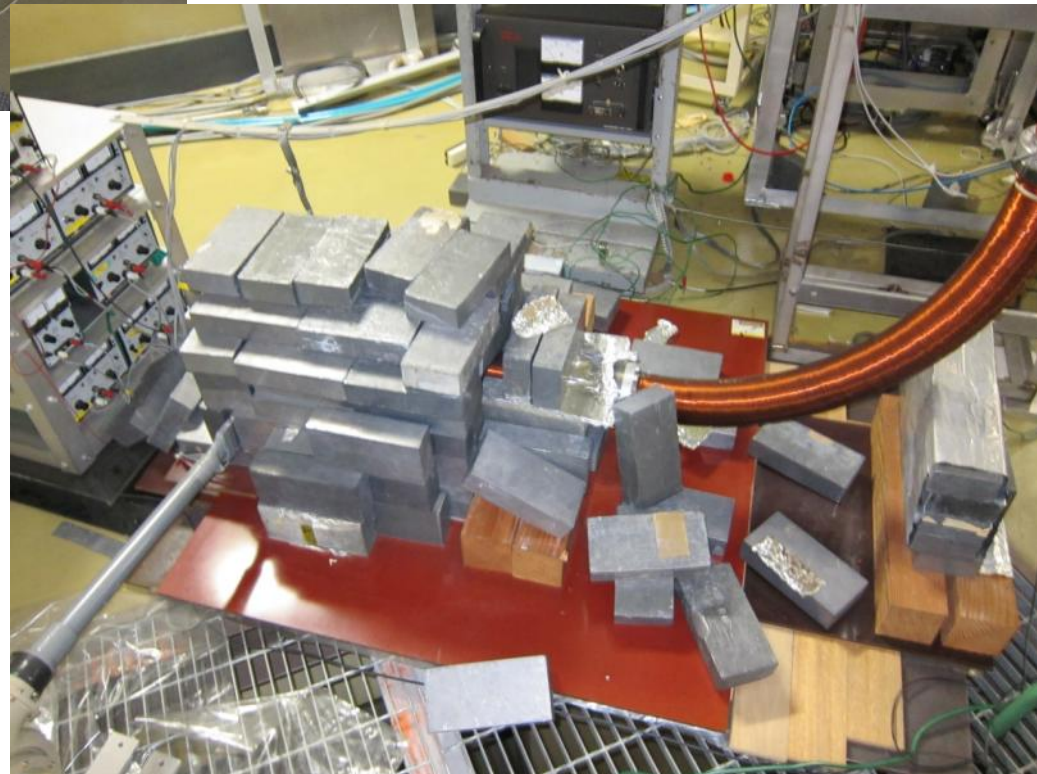


# 他設備の被害

- 遮蔽扉ロック機構(2か所)
  - 回転式遮蔽扉をロックする機構
  - アンカーボルトの引抜耐力を超え、脱落
  - 大扉が戸外に対して開いたままになり、福島原発事故由来のヨウ素、セシウムなどの侵入・汚染を防げず









# 復旧計画

- 3次補正予算(11/21成立)に計上してあった復旧費が、12/7にようやく使用可能になった。
- 3.75MVシングルエンド・バンデグラーフ
  - 変形部分および部品の修正・更新
  - 年明け試運転を目指す
- 1MVタンデトロン
  - 東大本郷の1.7MVタンデトロンを代替機として移設
  - 早くてH24年度末までかかる見通し

# まとめ

- 微粒子加速実験も10年以上の経験と実績を積み、安定して実験に提供できるようになった。加速電圧は現時点で世界最高。
- 成果がいくつか探査計画に採用され、既に打ち上げられたもの(ALADDIN)もある。今後更に校正データの蓄積が必要となる。
- 専用機でないため時間的な制約も多いので、本来は専用機を国内で整備することが望ましい。
- 東北地方太平洋沖地震で加速器本体および付帯設備が被災し、現状は実験不可能な状態のままである。費用の目途がついたので、復旧作業を加速させ、バンデグラフは2012年早々に復旧を目指す。

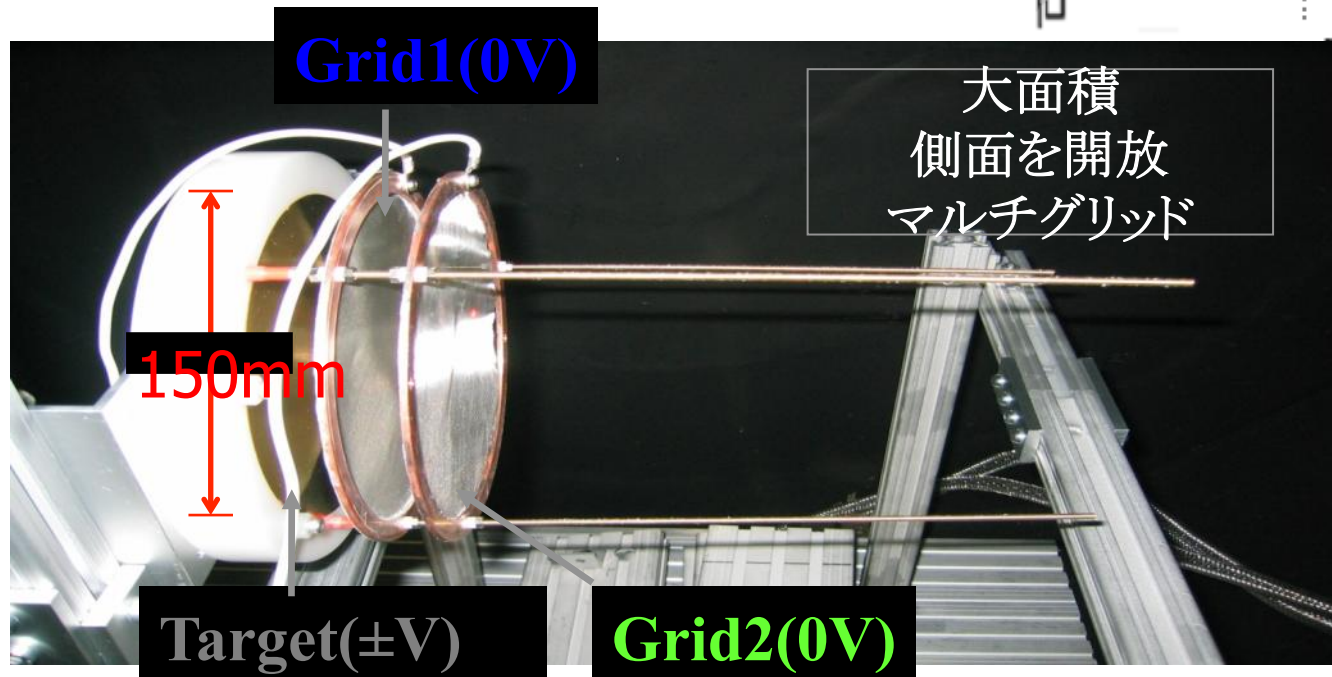
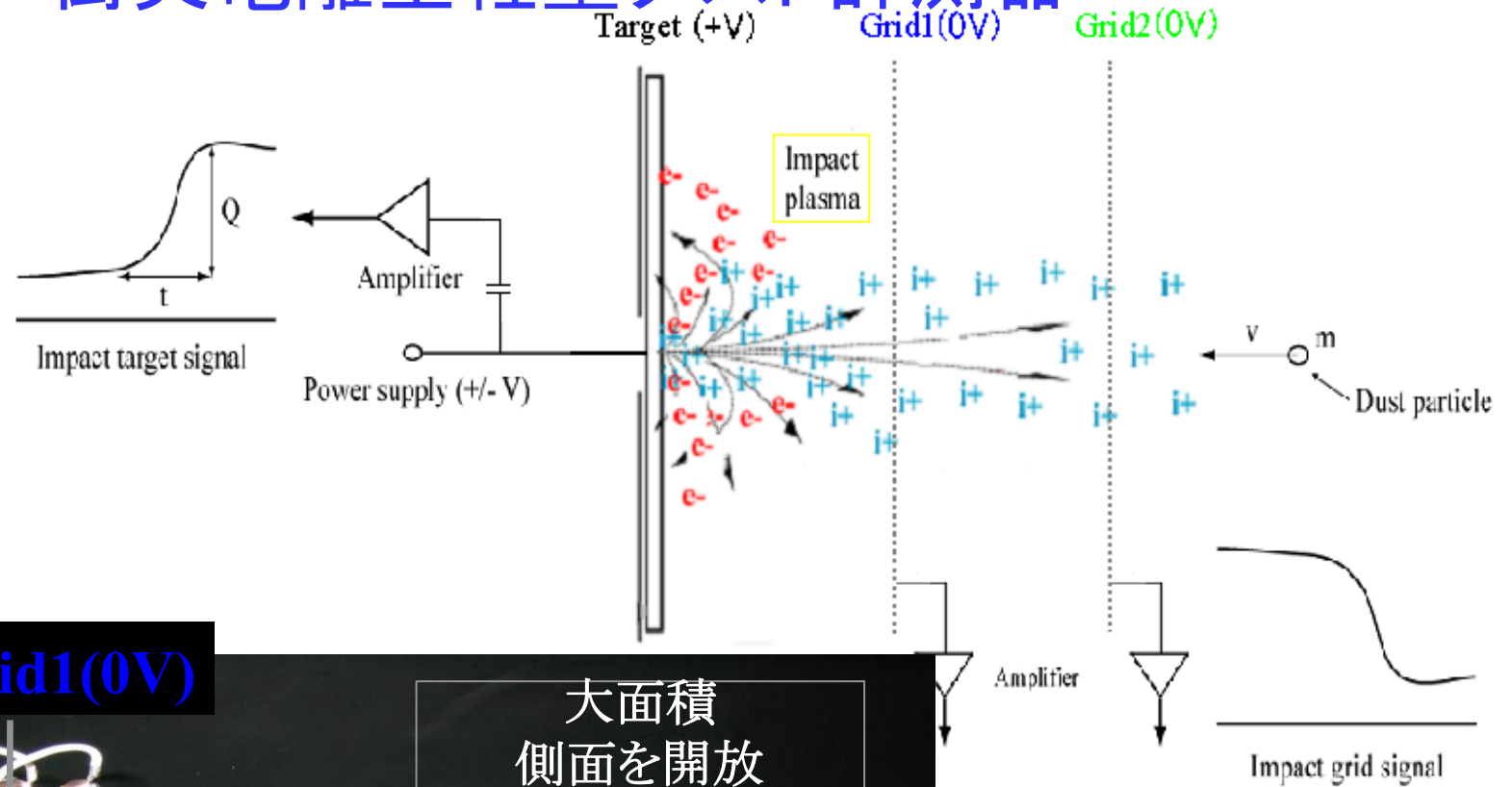


ご清聴ありがとうございました

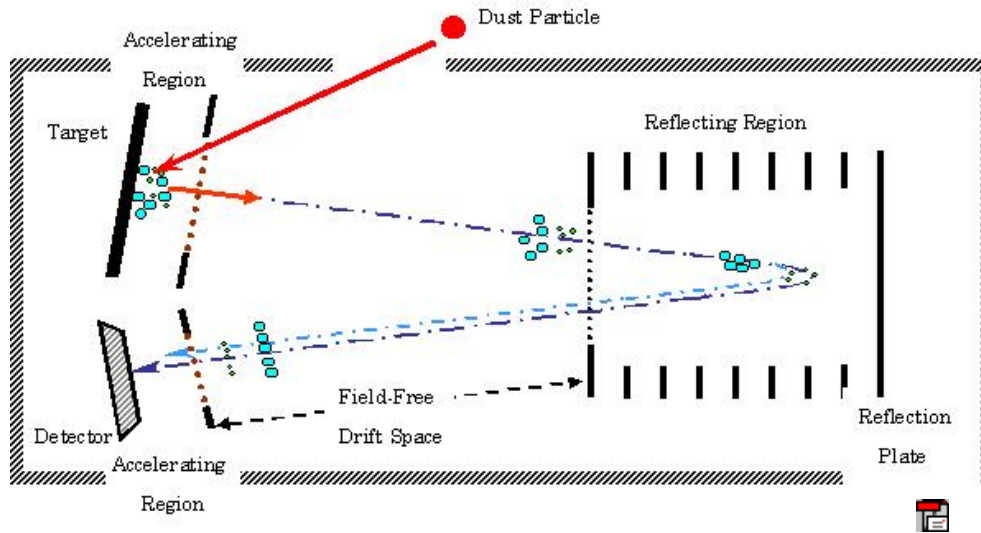




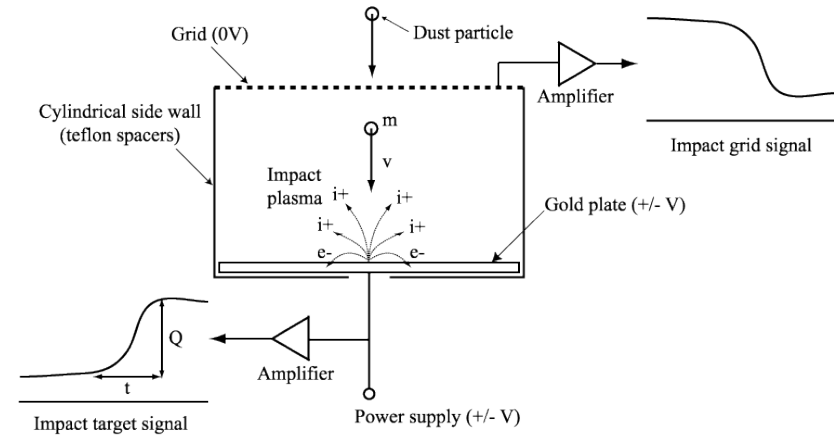
# 衝突電離型軽量ダスト計測器



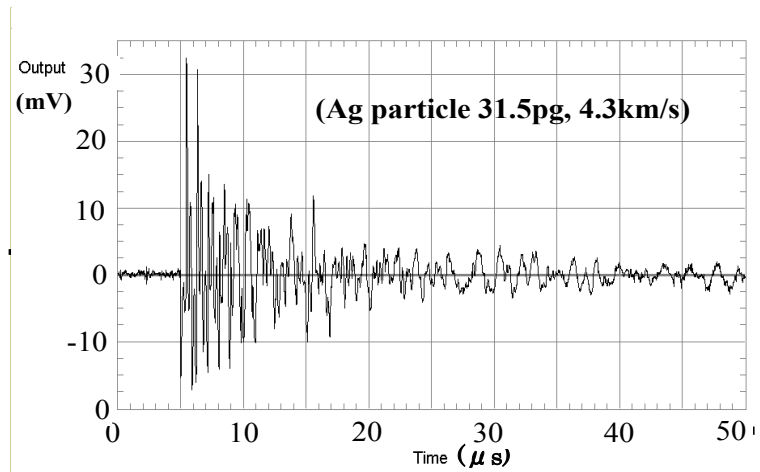
## TOF型質量分析器



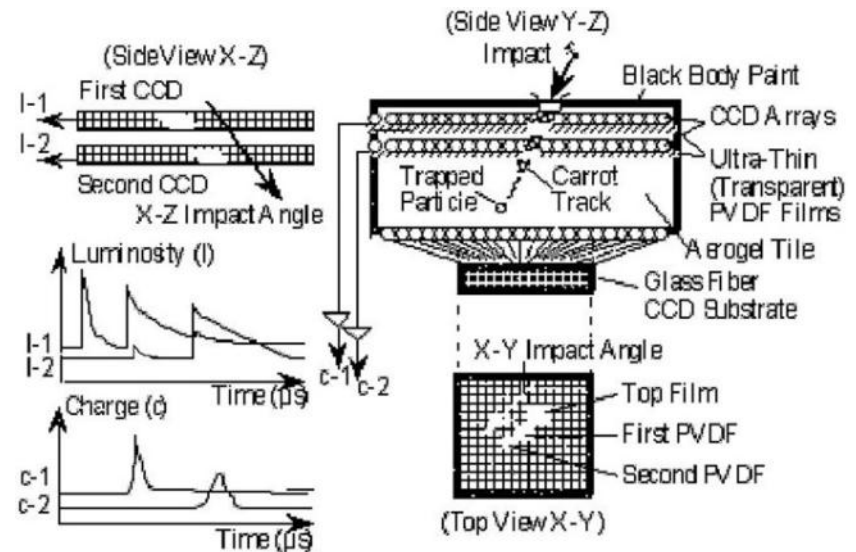
## 衝突電離型軽量ダスト計測器



## 圧電素子型軽量リアルタイムダスト計測器



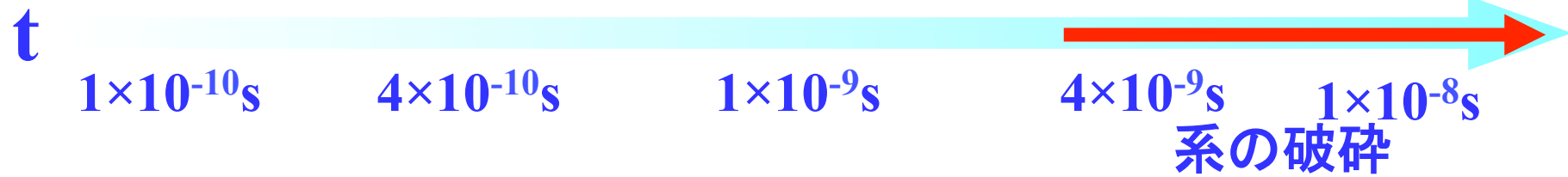
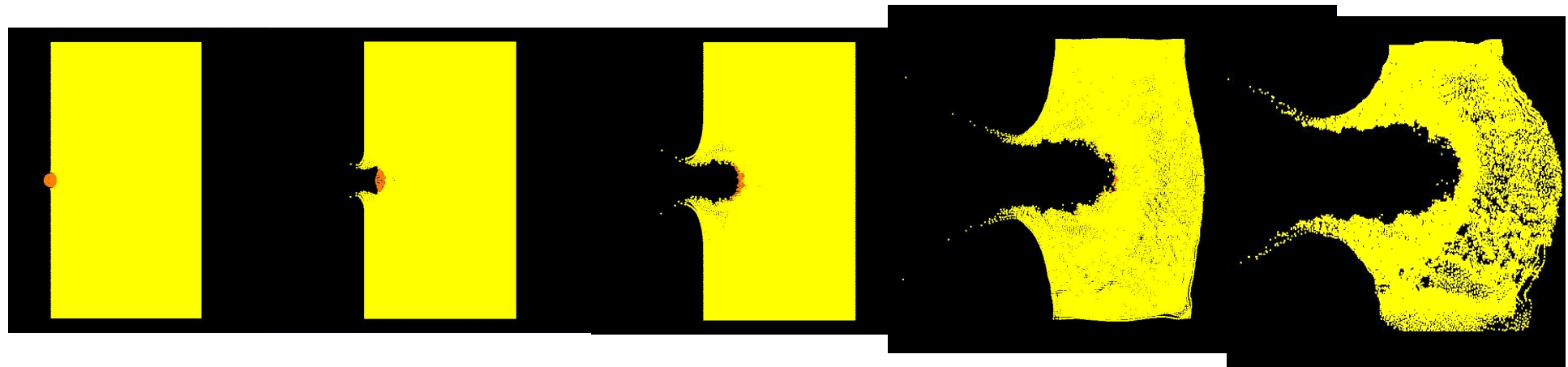
## 捕集・分析ハイブリッド型



# 計算結果 I

衝突時間を変化させて計算

衝突速度5000m/s



- ・経過時間 大 ⇒ 衝突痕直径 大
- ・残留微粒子分布 ⇒ 経過時間大 ⇒ 飛散



# 加速器年間スケジュール

月	4月				5月					6月				7月				8月				9月				
週	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
運転点検予定	12ヶ月点検			4/23 利用運転	調整	5/7 利用運転				調整	6/11 利用運転				3ヶ月点検			8/6 （VdGは微粒子加速） 利用運転				6ヶ月点検			管理部利用	
	← 上半期 →																									

月	10月					11月					12月				1月				2月				3月				
週	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	
運転点検予定	管理部利用	10/9 利用運転				調整	11/12 利用運転				3ヶ月点検			管理部利用・冬期 運休		1/15 利用運転		管理部利用		2/12 （VdGは微粒子加速） 利用運転				12ヶ月点検			
	← 下半期 →																										

# 静電加速器による微粒子加速の必要性

## 宇宙塵 (cosmic dust) の模擬

大きさ:  $0.1 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$ , 相対速度:  $10 \text{m/s} \sim 100 \text{km/s}$

構成元素: Si, C, H, O, N 等

### ★科学的ニーズ

宇宙空間の始原的な物質情報

### 太陽系・宇宙の進化を解明する手がかり

宇宙空間(地球周回軌道、静止衛星軌道を含む)では、  
ダスト・デブリ粒子の質量、速度、方向の計測が、粒子の

起源を知るために不可欠→計測器開発

### ★工学的ニーズ

人工衛星への衝突影響の評価