ハイパースペクトル イメージングを用いた 粒子加速器用 高周波加速空洞の ブレークダウン引き金機構の解明研究

阿部 哲郎

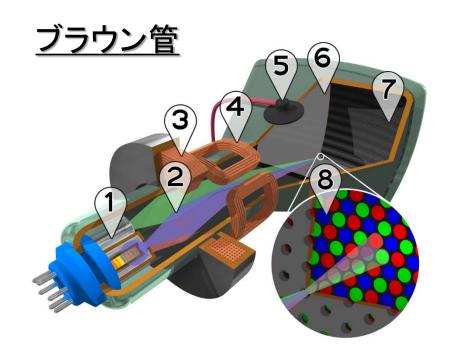
< tetsuo.abe[at]kek.jp >

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構(KEK)
/ 加速器研究施設

研究会「ハイパースペクトル・マルチスペクトルデータの計測と産業応用」 @東京工業大学/大岡山キャンパス 2018年12月10日

粒子加速器(Particle Accelerator)とは、

- 電子などの荷電粒子を加速する(エネルギーを与える)装置
 - 例:ブラウン管、X線管、電子顕微鏡など



X線管集束カップタングステンターゲット (陽極)期ガラス壁よよよまま<

タングステンフィラメント(陰極)

2.電子ビーム 3.集東コイル

1.電子銃

4.偏向コイル

4.1偏り 11 / 1

5.陽極端子

6.シャドーマスク

7.色蛍光体

8.色蛍光体を内側から見た拡大図

ウィキペディアより (https://ja.wikipedia.org/wiki/ブラウン管)

図1 X線管の構造

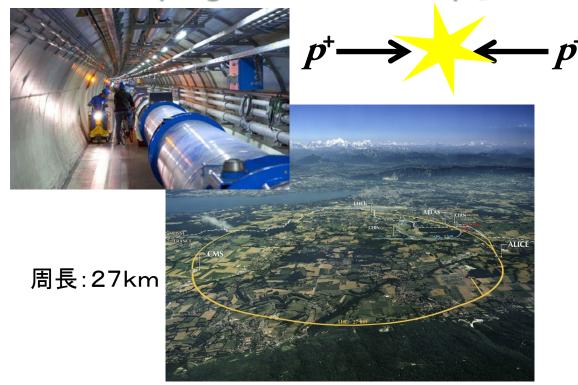
[出典]日本非破壊検査協会:放射線透過試験 I(1989)

高エネルギー加速器

- 高いエネルギーの粒子衝突における素粒子反応を調べるための大型装置
 - 宇宙初期を再現(ある意味、タイムマシン)
- 素粒子物理学/高エネルギー物理学への重要なインプットを与える <例1>



<例2> LHC (Large Hadron Collider) @ CERN

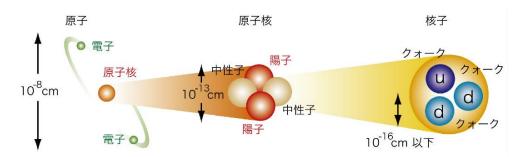


CERNのウェブサイトより(https://home.cern/topics/large-hadron-collider)

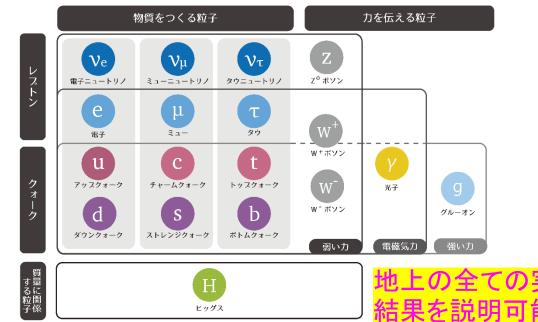
高エネルギー物理学

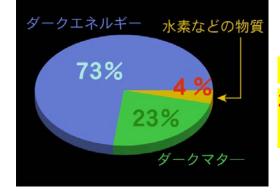
「国際リニアコライダー(ILC) その展望とKEKの取組み」より抜粋

(https://www2.kek.jp/ilc/ja/contents/docs/ilc_201806_02.pdf)



素粒子物理学の「標準理論」

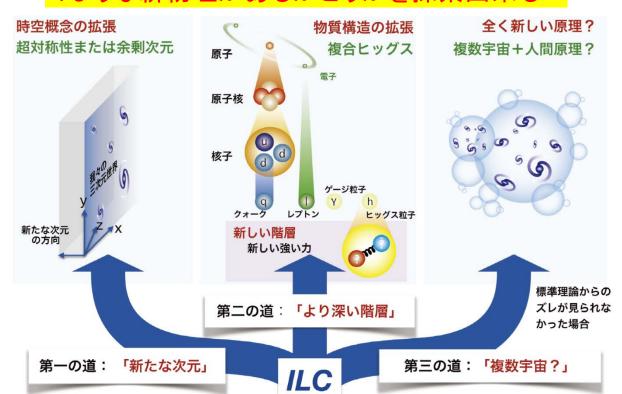




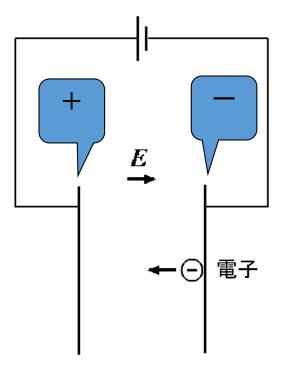
しかし、宇宙を見てみると、 標準理論で説明出来るの は、たった数%!

(https://www2.kek.jp/ja/newskek/2010/mayjun/darkmatter.html より)

今後、更なる高エネルギー実験で、例えば、下記 のような新物理があるかどうかを探索出来る!



高エネルギーを得るために、 静電場を使って荷電粒子を加速してみる



最も基本的な加速装置

1ボルト(V)の電位差により 電子が得るエネルギーが 「1電子ボルト(eV)」。

 $1eV \cong 1.602 \times 10^{-19} J \cong 38.3 \times 10^{-21} cal$

J: ジュール cal: カロリー

10³ eV = 1 keV (X線を発生させるエネルギー・スケール) 10⁶ eV = 1 MeV (原子核物理のエネルギー・スケール) 10⁹ eV = 1 GeV (これ以上が高エネルギー物理のエネルギー・スケール) 10¹² eV = 1 TeV (今後は、このくらいのエネルギーが必要)

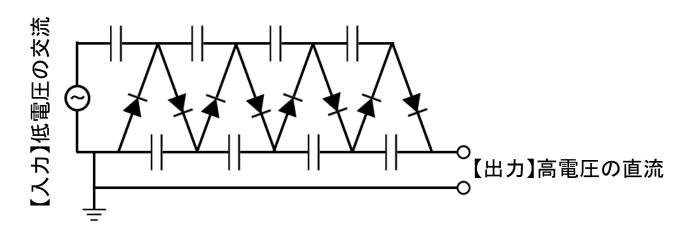
静電加速装置の例

→静電場を立てて荷電粒子を加速する装置

●コッククロフト・ウォルトン型

- ▶ 耐電圧の問題により、10 MeVが原理的限界

<コッククロフト・ウォルトン回路の例>



KEKで作られたたコッククロフト・ウォルトン型 静電加速器(750 keV)



さらに高いエネルギーまで加速するには、

素粒子・原子核・物質科学では、1ギガ電子ボルト(1GeV)以上の 高エネルギー粒子ビームが必要なことが多い。

コッククロフト・ウォルトン型加速器100台以上!

窓このような超高電圧は不可能(放電の問題)



(放電限界以下の電圧による) 繰り返し加速が必要!

静電場で円形の繰り返し加速を試みると、、、

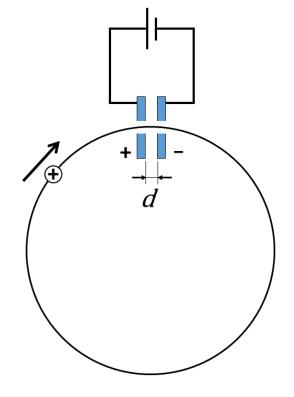


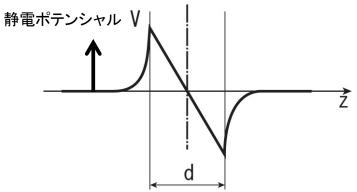
電極間では加速されるが、 その外で減速され、結局、 加速されない。

静電ポテンシャルとは電気的位置エネルギー。 荷電粒子は、静電ポテンシャルの高いところから 低いところへ転げ落ちる。

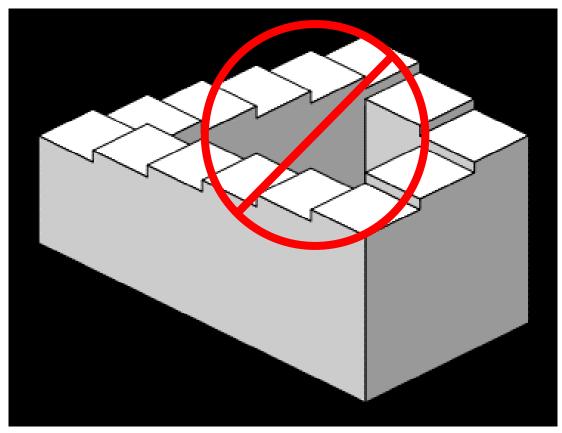


加速装置にならない!





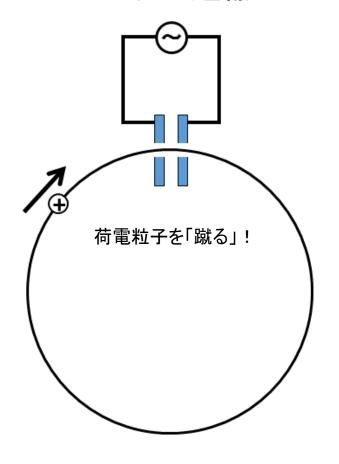
ペンローズの階段



(ウィキペディアより)

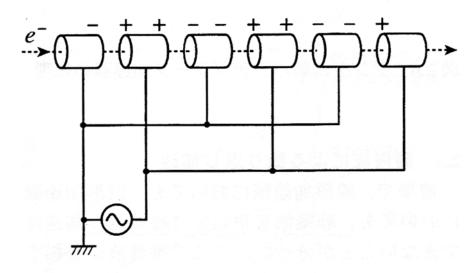
マイクロ波(高周波)の電場を使って繰り返し加速

円形加速器

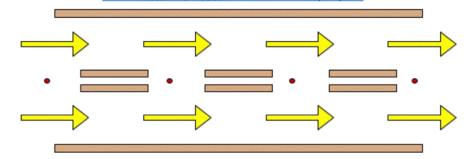


直線加速器

(全体で大きな電位差とならない)

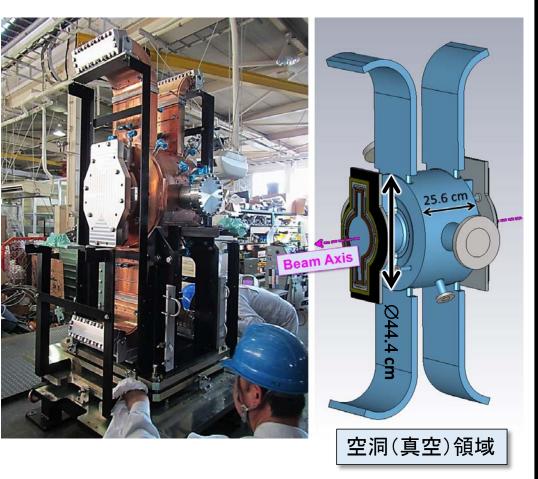


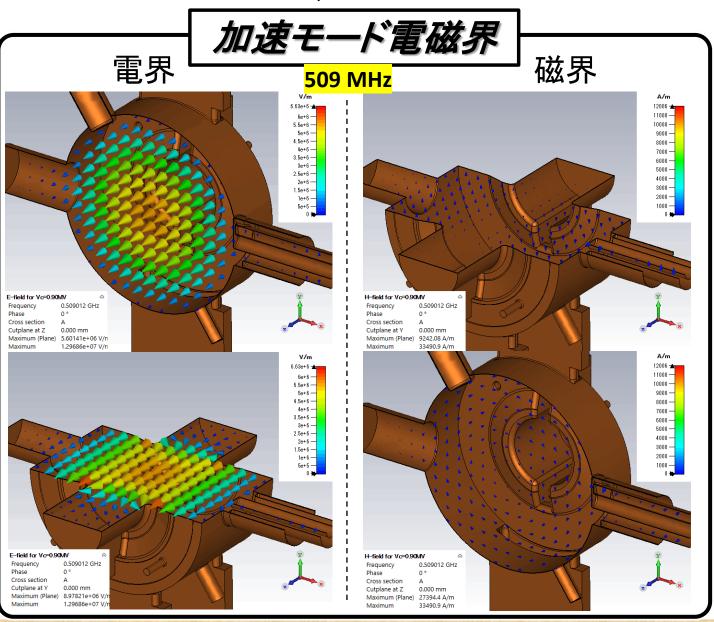
(KEK加速器研究施設トピックス 2010/11/25 より)



本研究で使用した加速装置

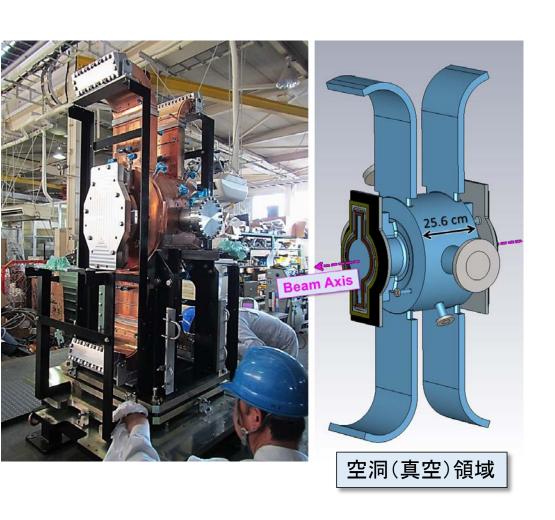
SuperKEKB/陽電子ダンピングリング用の 常伝導高周波加速空洞





本研究で使用した加速空洞

SuperKEKB/陽電子ダンピングリング用の常伝導高周波加速空洞の零号機(試験機)



- ■空洞内部の真空圧力: ~10⁻⁵ Pa
- ■材料:無酸素銅クラス1
- ■加速モード: 509 MHz 連続波 TM₀₁₀
- $\blacksquare Q_0 = ^29000 (93\%IACS)$
- $\blacksquare R_{\rm sh}/Q_0 = 150 \Omega$
- ■空洞電圧(定格): V_c = 0.80 MV

$$\rightarrow E_{acc} = 3.1 \text{ MV/m}$$

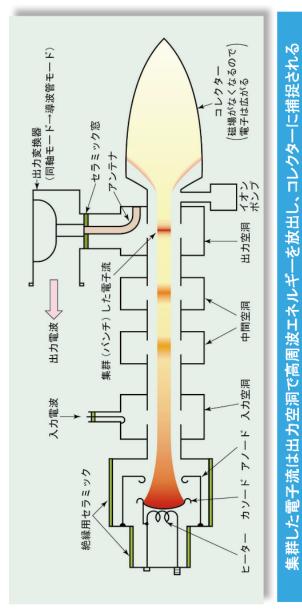
■壁面損失電力:約146 kW(@V。= 0.80 MV)

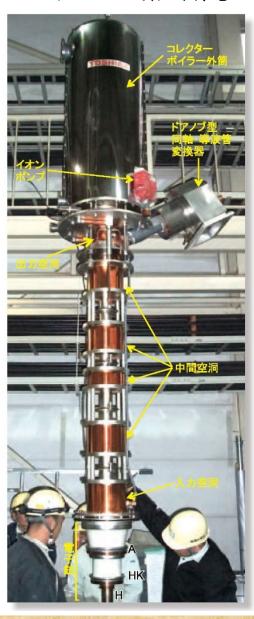
詳しくは、下記を参照

阿部 哲郎、「SuperKEKB陽電子ダンピングリング用の高周波加速空洞実機1号機が完成」、KEK 加速器研究施設トピックス 2013/9/5(Web記事):

http://www2.kek.jp/accl/topics/topics130905.html

マイクロ波源:「クライストロン」





出 力 連続波100万ワット(Philips社)

120万ワット (東芝)

入 カ 1~80ワット

周波数 5億ヘルツ(508.9MHz)

入力電力 最大180万ワット

(9万ボルトx20アンペア)

効 率 60~70パーセント

コレクター冷却方式

水が蒸発する時に奪う多量の

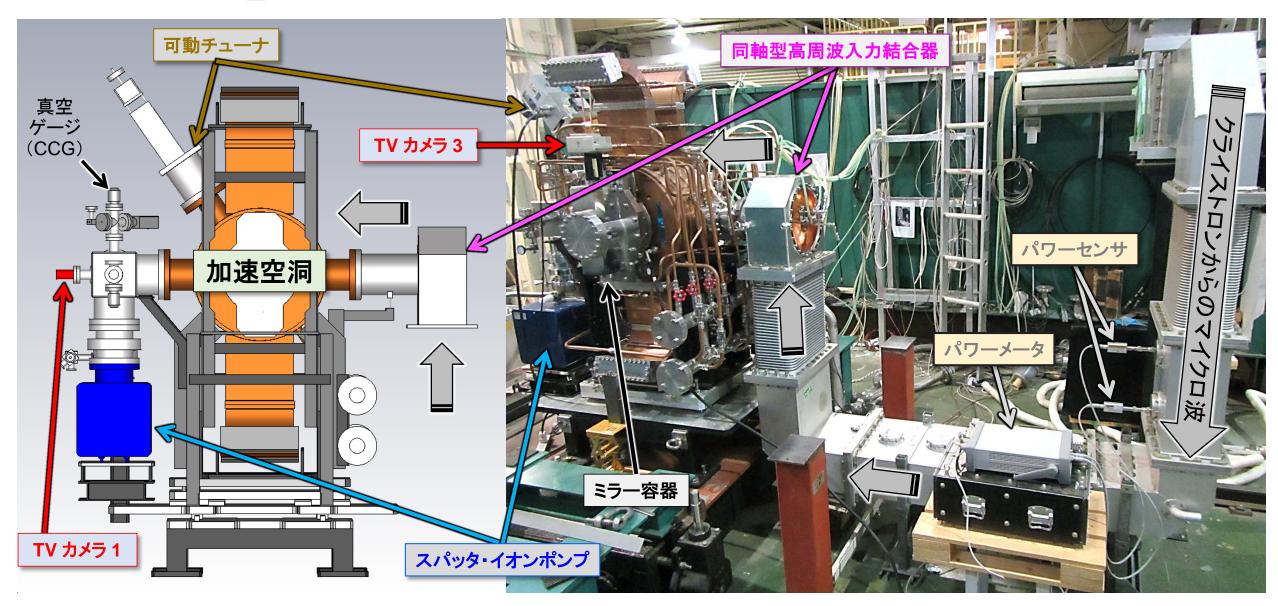
気化熱を利用して効率良く冷やす。

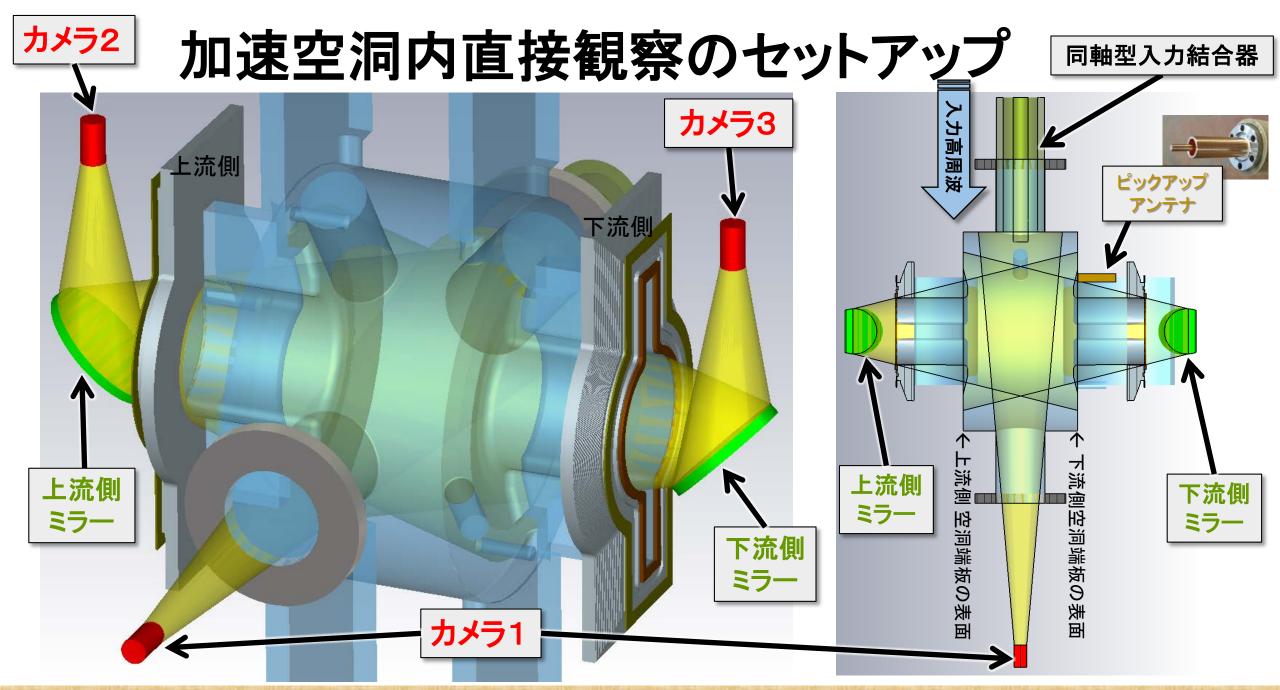
使用台数 35台(KEKB 27台、PF-AR 2台,

テストステーション他 6台)

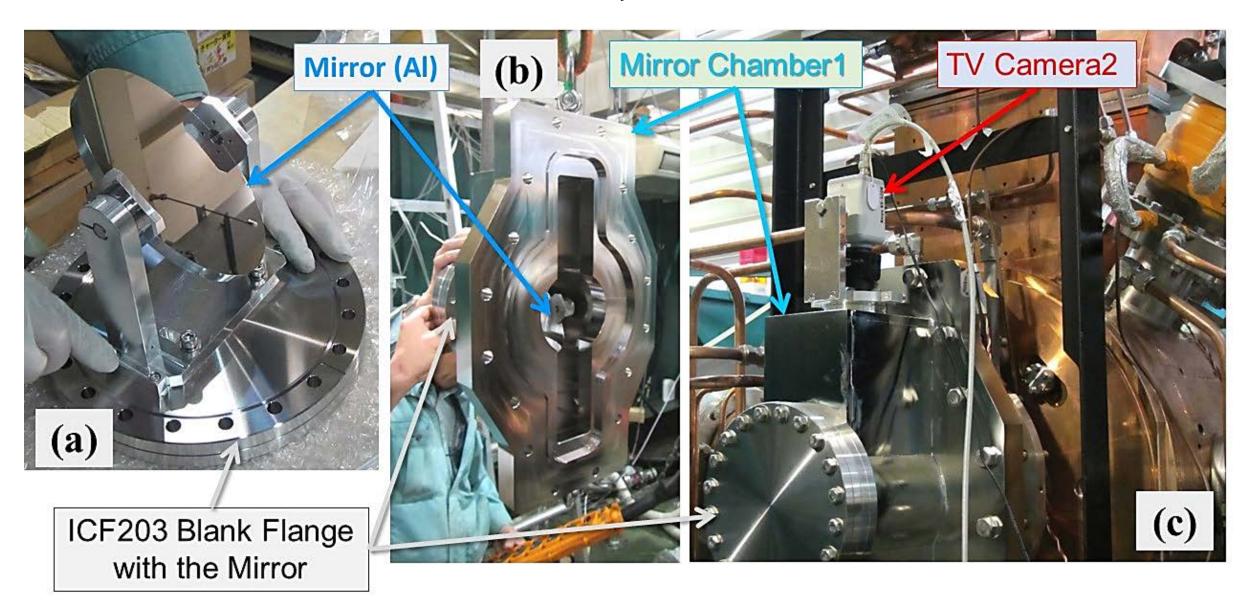
(Super)KEKB用クライストロン(「もっと知りたい」パンフより)

大電カテスト・スタンドにおけるセットアップ





ミラー

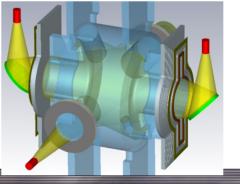


TVカメラ



撮像センサー	1/3-inchi CCD
感度	0.05 lux (color)
S/N	> 52 dB
ピクセル数	52x10 ⁴ pixels
出力フォーマット	NTSC
フレーム率	30 fps
価格	約2万円

サファイア窓

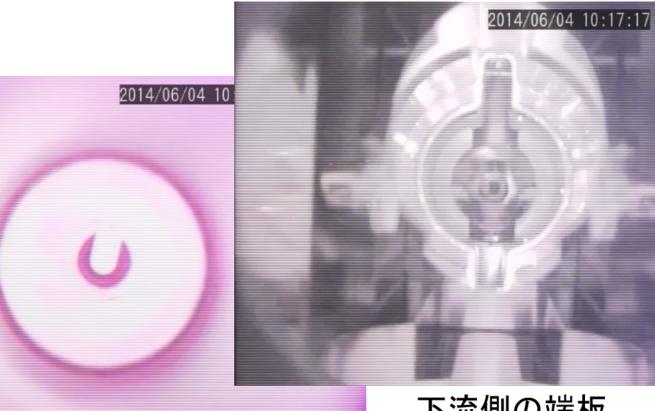


大真空放電!

 $V_c = 0.89 \text{ MV } (E_{acc} = 3.5 \text{ MV/m})$



上流側の端板



下流側の端板

側面(サイドビュー)

大真空放電→ブレークダウン(真空絶縁破壊)が起こると、

- 金属共振器としての境界条件を満たせなくなり、 入力したマイクロ波はほぼ全反射
 - →粒子を加速出来なくなる
- ひどい時には、大真空放電により、深刻な損傷を 受けることもある

つまり、加速空洞の性能は、

- ✓低いブレークダウン発生率を保ちつつ、
- ✓いかに高い加速電界を達成出来るかどうか

で決まる

しかし、加速電界が高ければ高い程、ブレークダウンの発生率は高くなる

問題は、ブレークダウンの引き金機構が未だ解明されていないこと!

本研究の目的

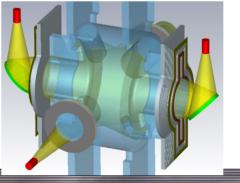
常伝導高周波加速空洞のブレークダウン引き金機構を解明

- → 加速空洞の性能向上への応用
- → 加速空洞の性能劣化に対する回復への応用

本研究の方法

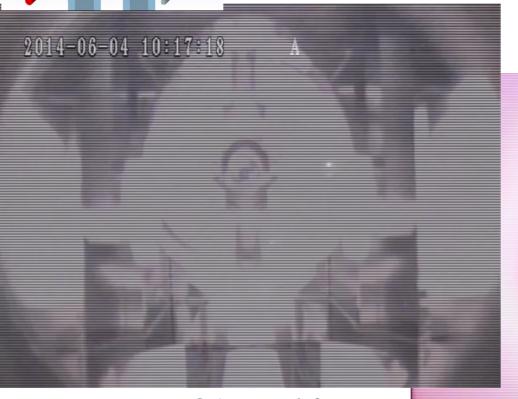
加速空洞内部を直接観察し、ブレークダウンの瞬間を視覚的にとらえる

- → 大真空放電の結果発生する「2次的・間接的」信号に依らない (反射マイクロ波、電流フラッシュ、X線、音響放射など)
- → カメラを使って3方向から加速空洞内部を直接観察

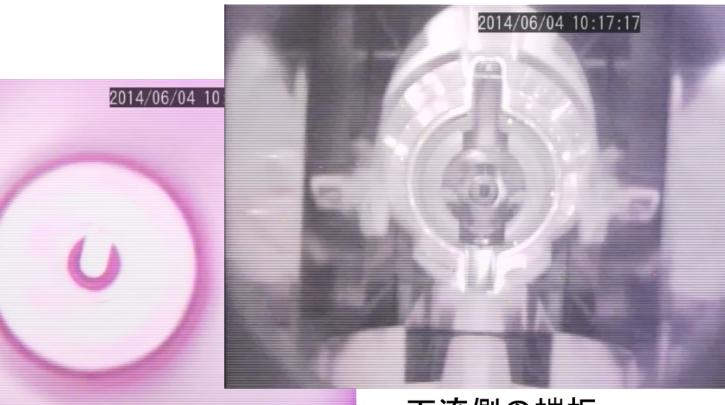


大真空放電!

 $V_c = 0.89 \text{ MV } (E_{acc} = 3.5 \text{ MV/m})$



上流側の端板

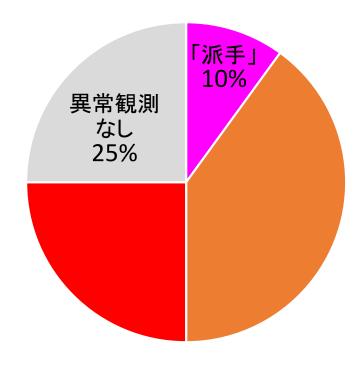


下流側の端板

側面(サイドビュー)

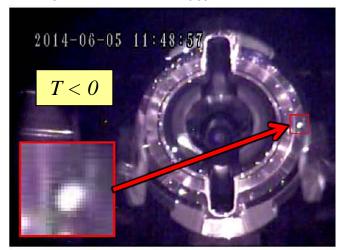
全205回のブレークダウン事象の内訳

- 10% 「派手」なブレークダウン(前項のような)
 - RFコンディショニングの初期でのみ発生

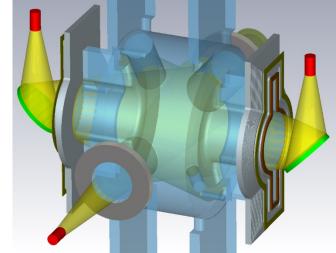


常時発光輝点

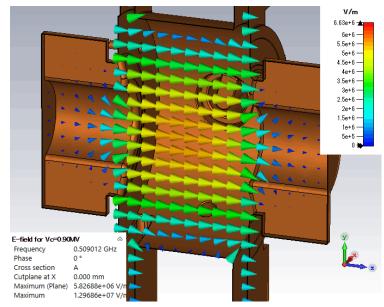
@ $V_c = 0.95 \text{ MV } (E_{acc} = 3.7 \text{ MV/m})$



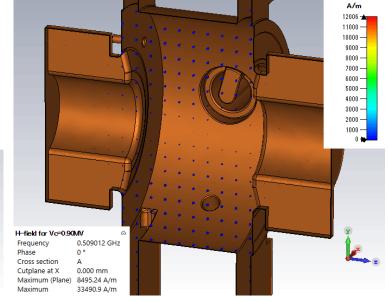
(a) 1 frame (1/30 s) before this cavity breakdown.



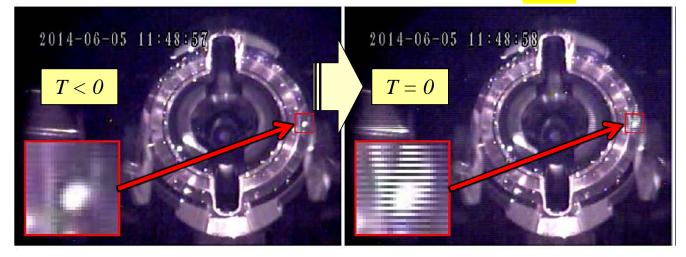
電界



磁界



常時発光輝点 @ V_c = 0.95 MV (E_{acc} = 3.7 MV/m) ブレークダウンの 瞬間に<mark>爆発</mark>



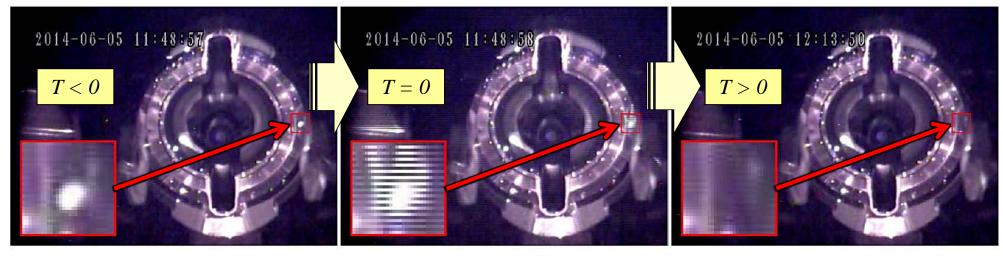
(a) 1 frame (1/30 s) before this cavity breakdown.

(b) At the moment of this cavity breakdown.

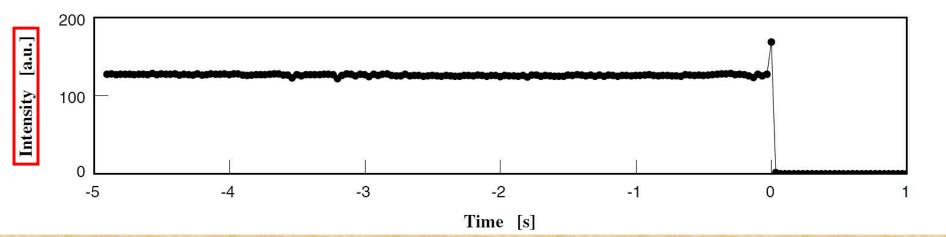
三二超新星爆発!

常時発光輝点 @ V_c = 0.95 MV (E_{acc} = 3.7 MV/m) ブレークダウンの 瞬間に爆発

その後、その輝点はない!



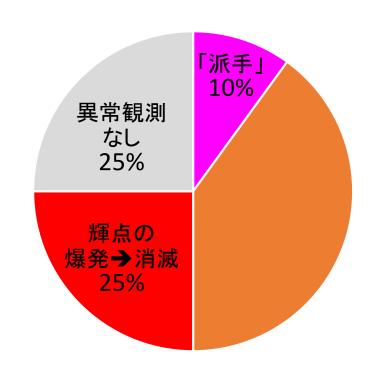
- (a) 1 frame (1/30 s) before this cavity breakdown.
- (b) At the moment of this cavity breakdown.
- (c) Shortly after recovering from this cavity breakdown at $V_c = 0.95$ MV.



全205回のブレークダウン事象の内訳

- 10% 「派手」なブレークダウン
 - RFコンディショニングの初期でのみ発生

■ 25% 常時発光輝点の「爆発→消滅」

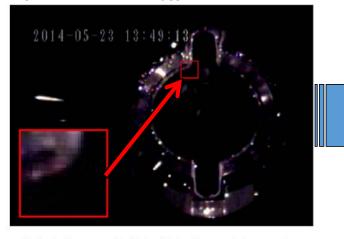


ブレークダウンの瞬間の観測例3 常時発光輝点のない箇所でのスポット型爆発

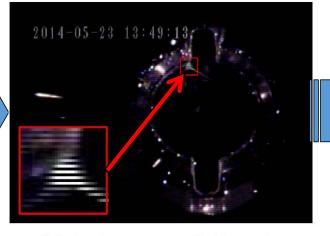
この領域に常時発光輝点なし (V_c = 0.65 MV (E_{acc} = 2.5 MV/m))

ブレークダウンの瞬間に スポット型爆発が発生!

ダウン



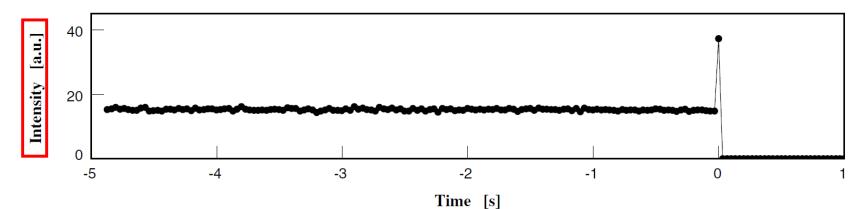
(a) 1 frame (1/30 s) before this cavity breakdown.



(b) At the moment of this cavity breakdown.



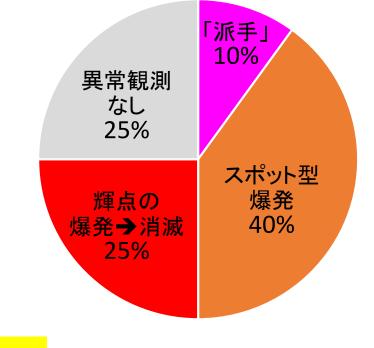
(c) 1 frame (1/30 s) after this cavity breakdown.



全205回のブレークダウン事象の内訳

- 10% 「派手」なブレークダウン
 - RFコンディショニングの初期でのみ発生

- 25% 常時発光輝点の「爆発→消滅」
- 40% スポット型爆発(@輝点の見られない箇所)



ひとつのブレークダウン事象で複数の爆発があることはなかった

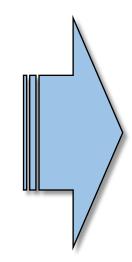
→輝点爆発やスポット型爆発がブレークダウンを引き起こした原因(引き金)

✓ 阿部 哲郎、「高周波加速空洞のブレークダウンの瞬間を「見た」!」、KEK 加速器研究施設トピックス 2016/10/5(Web記事): http://www2.kek.jp/accl/topics/topics/61005.html

✓ T. Abe, T. Kageyama, H. Sakai, Y. Takeuchi, and K. Yoshino, "Breakdown Study Based on Direct In-Situ Observation of Inner Surfaces of an RF Accelerating Cavity during a High-Gradient Test", Physical Review Accelerators and Beams 19, 102001 (2016).

輝点がブレークダウンの引き金の「種」であることはわかったが、 【疑問】輝点は何者か?

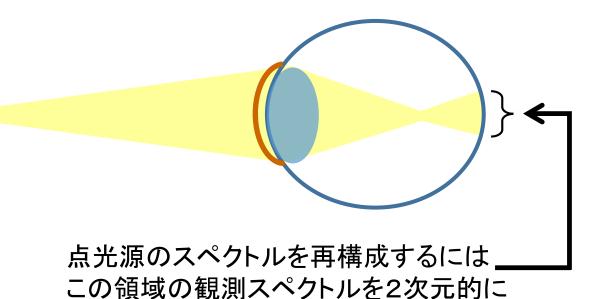
- ●<mark>発光スペクトル</mark>は?
- ●<mark>温度</mark>は?
- ●<mark>なぜ爆発</mark>するのか?



今回、

ハイパースペクトルカメラ を使って輝点のスペクトルを 測定した

点光源からの光を分光する時の注意点



- ■加速空洞の内表面は鏡面仕上げなので、空洞内の輝点に対して完全にピントを合わせることは難しい
- ■レンズに分散がある
- 輝点のスペクトル測定には、 2次元分光が必要

足し上げる必要あり

本研究で使用したハイパースペクトルカメラ

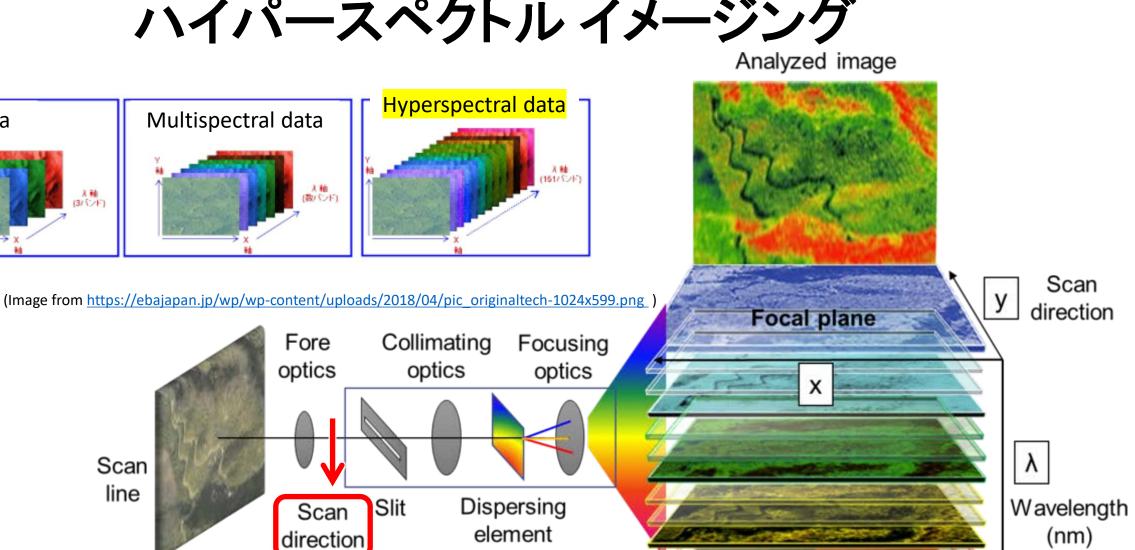
Model: NH-KE3 エバ・ジャパン製

https://ebajapan.jp/spectraltechnology/



項目	仕様
イメージセンサー	CMOS
ピクセル数	360,000
最高フレーム率	100 fps
ビット数	10
観測可能波長領域	400 ~ 1000 nm
波長分解能	5 nm
筐体サイズ	H76.0mm x W72.4mm x L213mm
重量	1030g

ハイパースペクトルイメージング



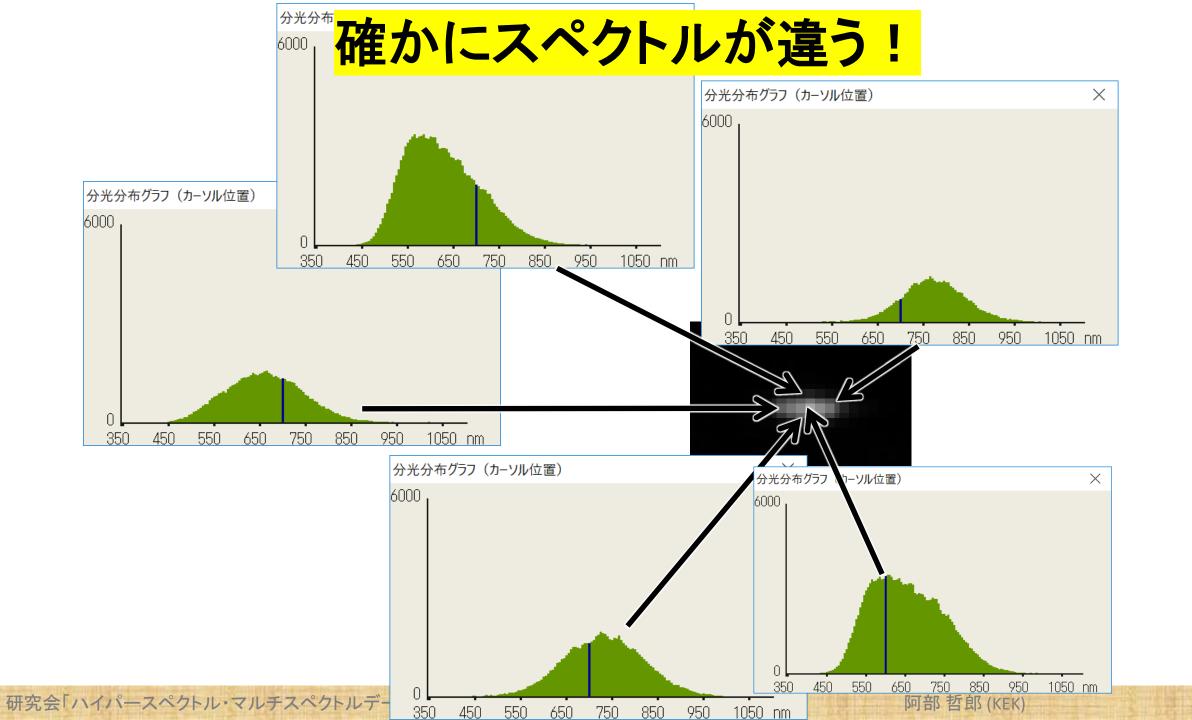
Hyperspectral data cube

RGB data

豆電球を使って検証

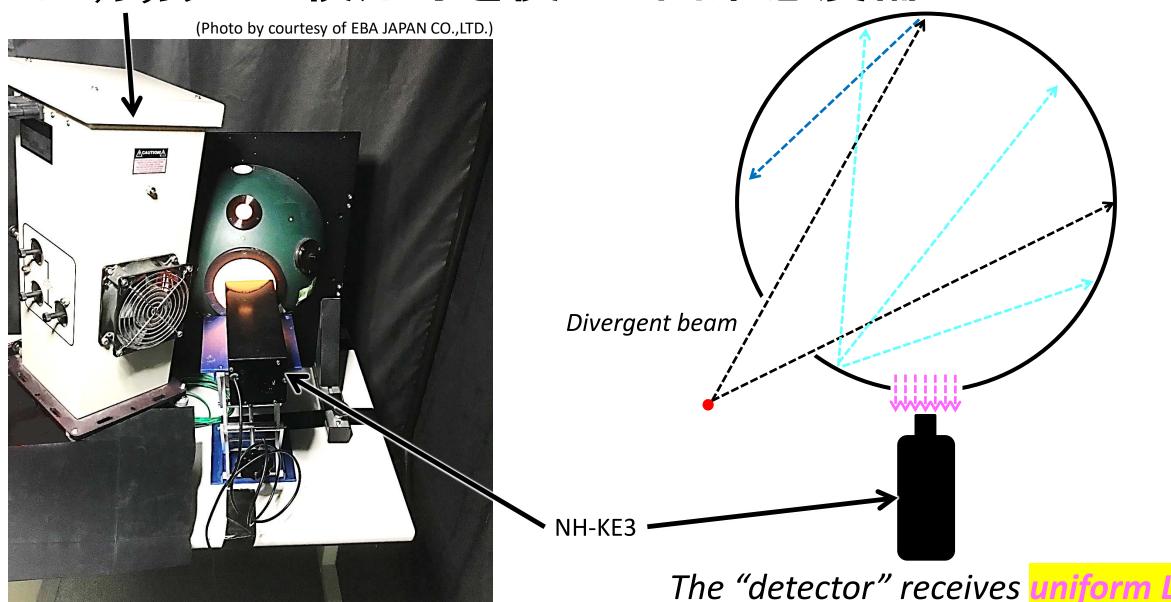


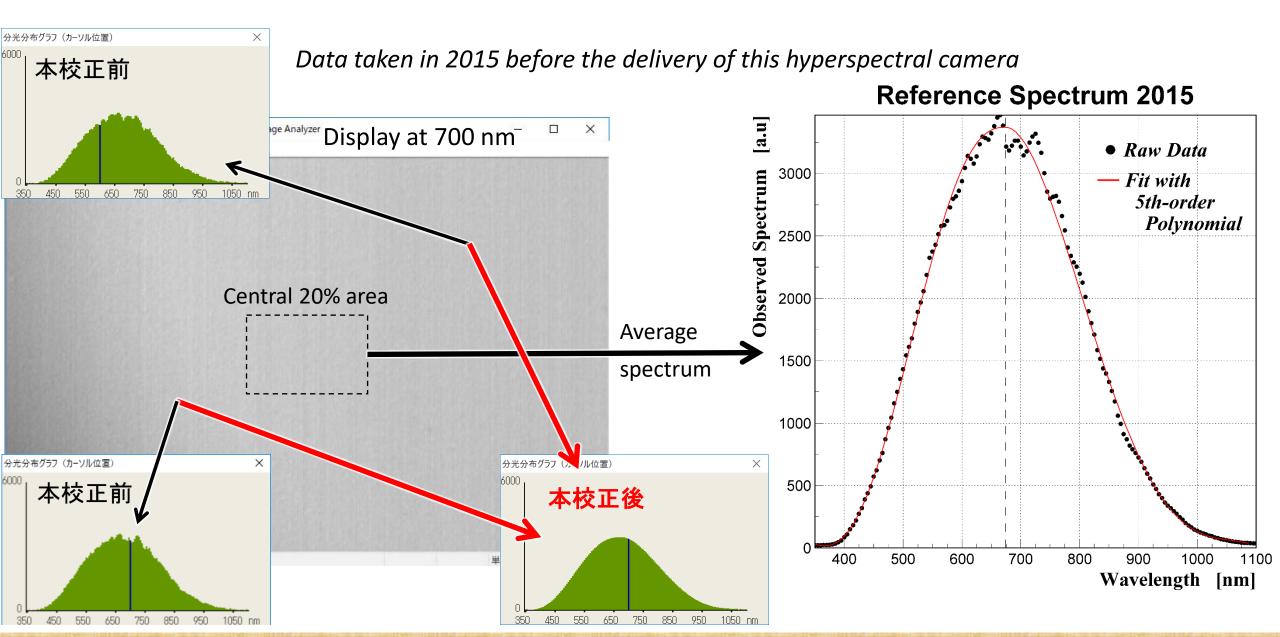
NH-KE3



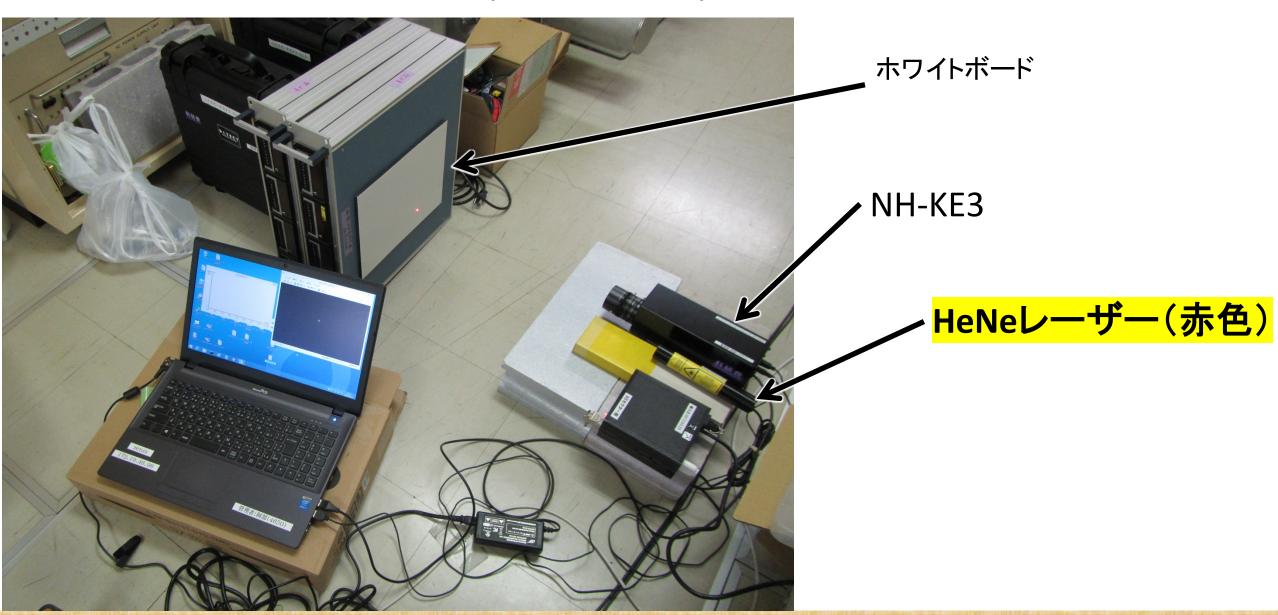
ハロゲンランプ

積分球を使った画素感度補正

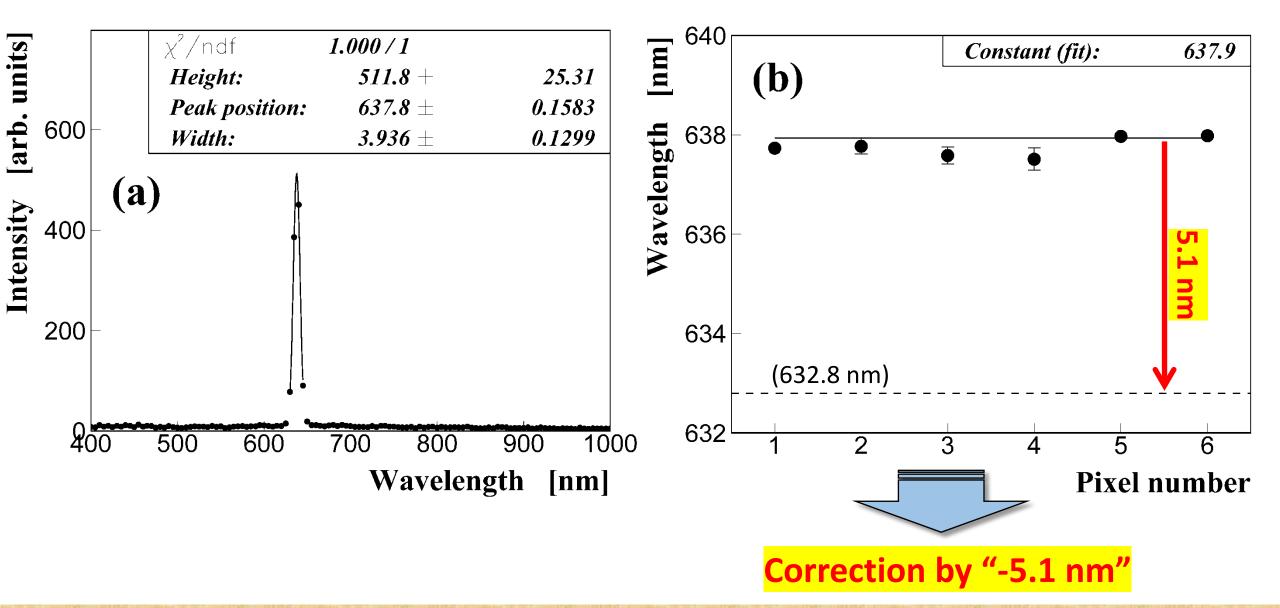




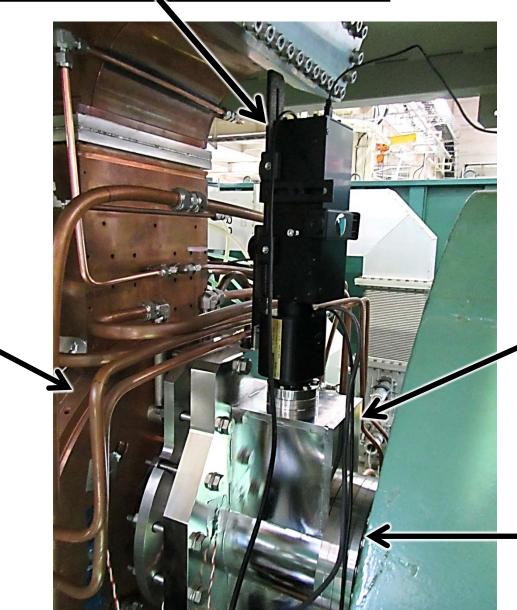
HeNeレーザー(632.8 nm)を使った波長校正



HeNeレーザー(632.8 nm)を使った波長校正



ハイパースペクトルカメラのセットアップ

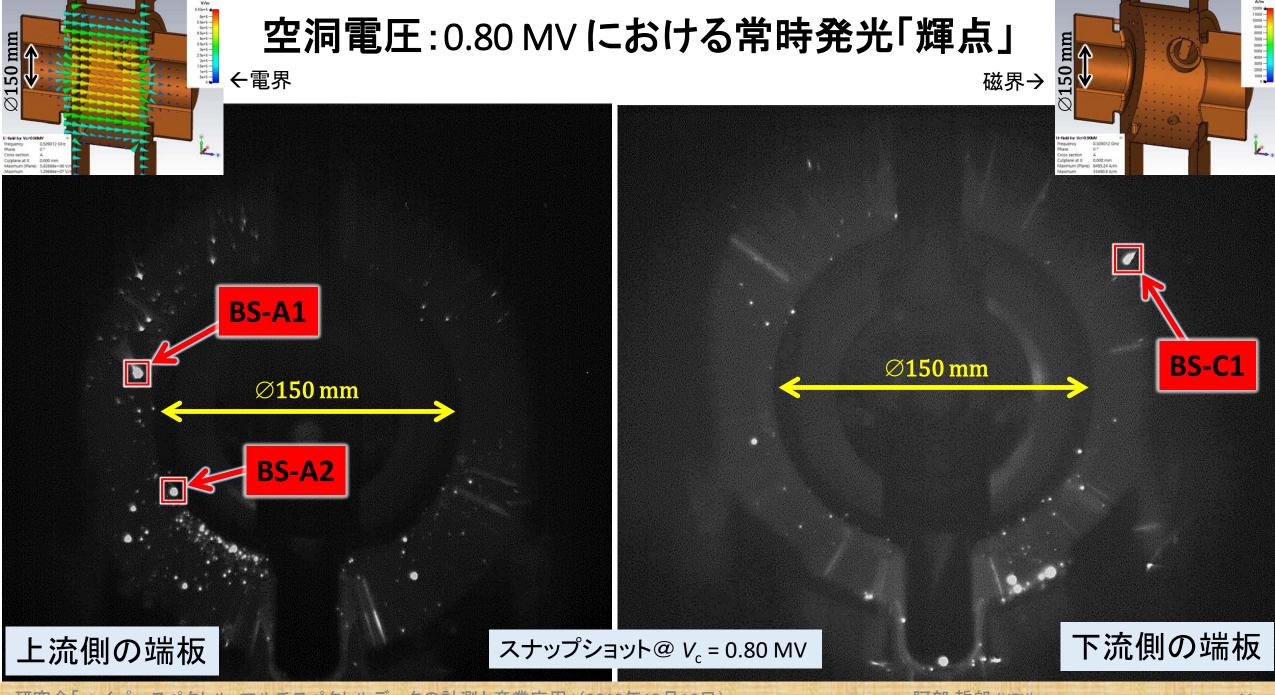


・ミラー容器

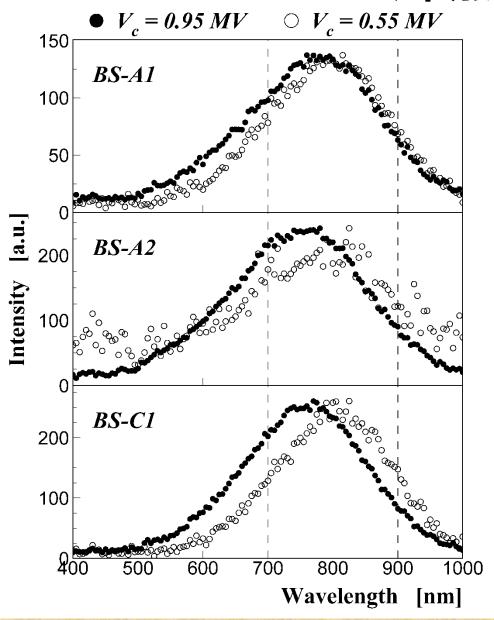
アルミ製ミラー



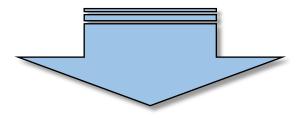
加速空洞



輝点の観測スペクトル



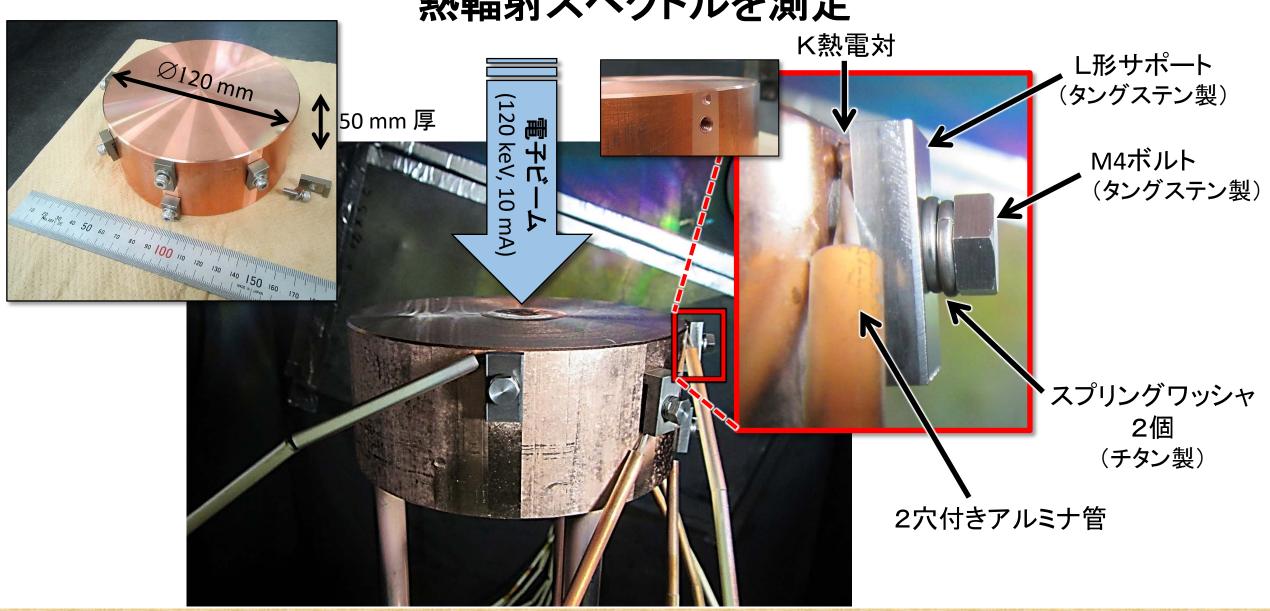
- ✓ 画素感度補正済み(積分球使用)
- ✓ 波長校正済み(HeNeレーザー使用)
- ✓ミラーとビューポート窓の補正済み
- ✓ バックグランド除去済み
 - ①可視光&近赤外領域で線・帯スペクトルなし
 - ②高い空洞電圧でスペクトルが短波長方向にシフト



輝点は熱輻射!

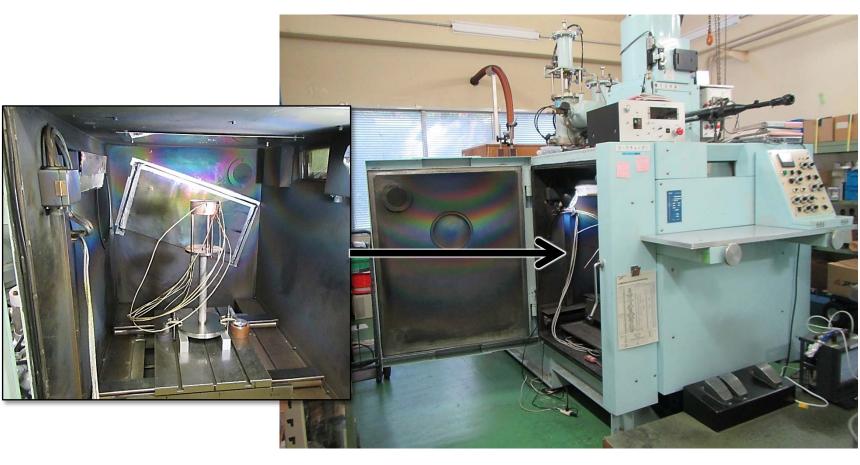
観測スペクトルを物理スペクトル に変換するために

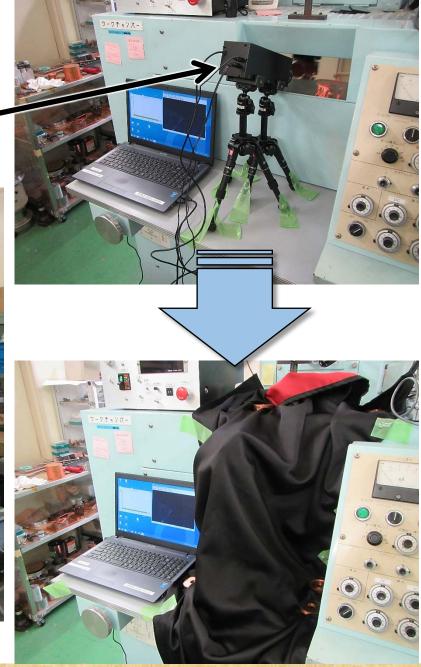
電子ビームを照射して高温にした銅ブロックを使って 熱輻射スペクトルを測定



KEK/機械工学センターの 電子ビーム溶接機を使用

NH-KE3

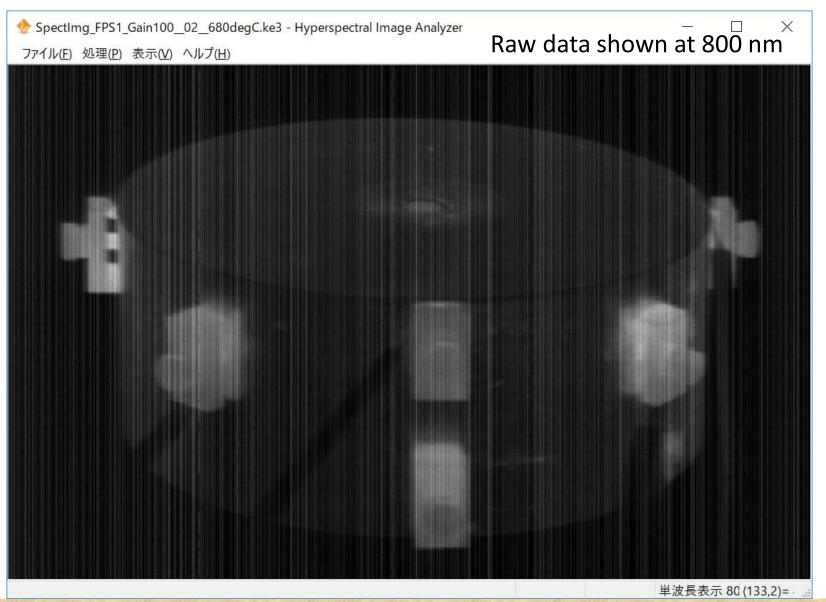




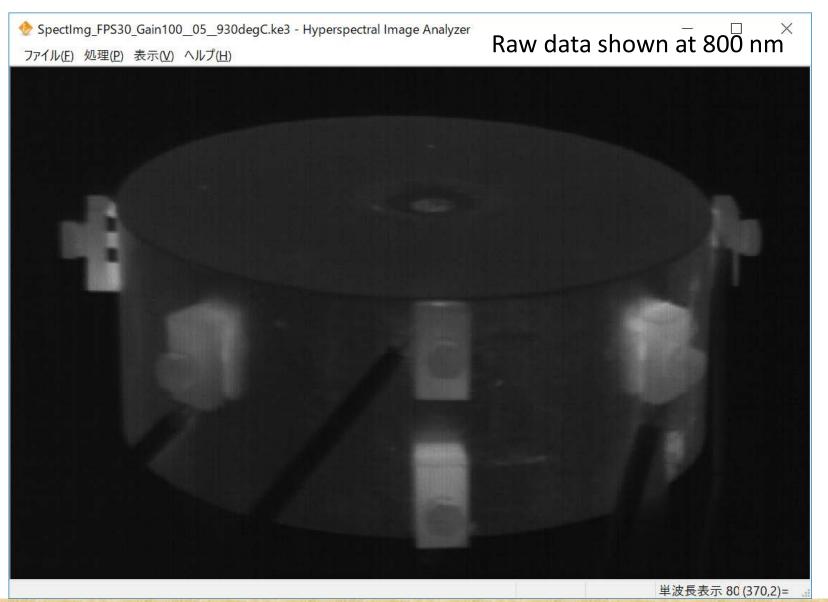
物温:約580℃



物温:約680℃



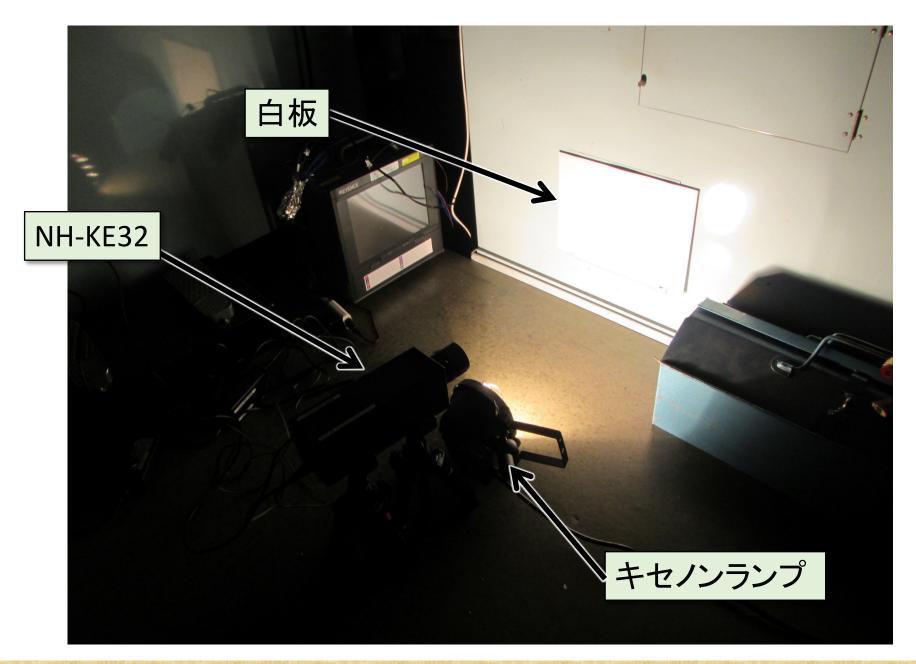
物温:約930℃



覗き窓の透過率測定

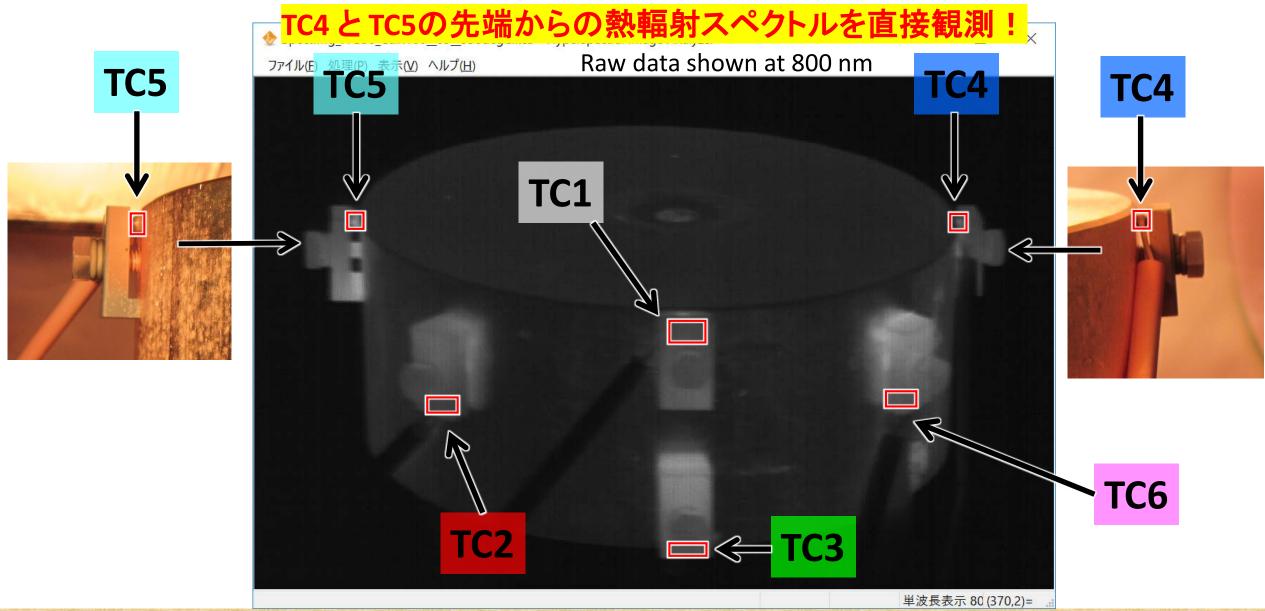
覗き窓(=鉛ガラス+テンパックスガラス)



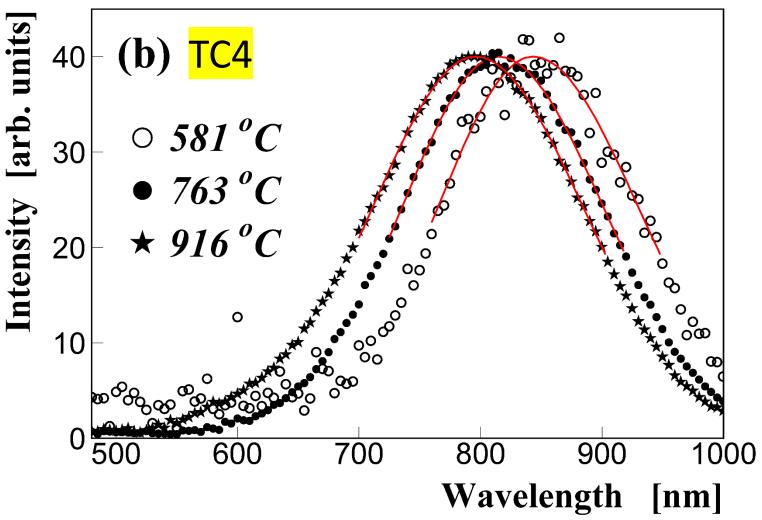


(**TC** : **T**hermo**C**ouple)

Thermocouples and Meas. Region

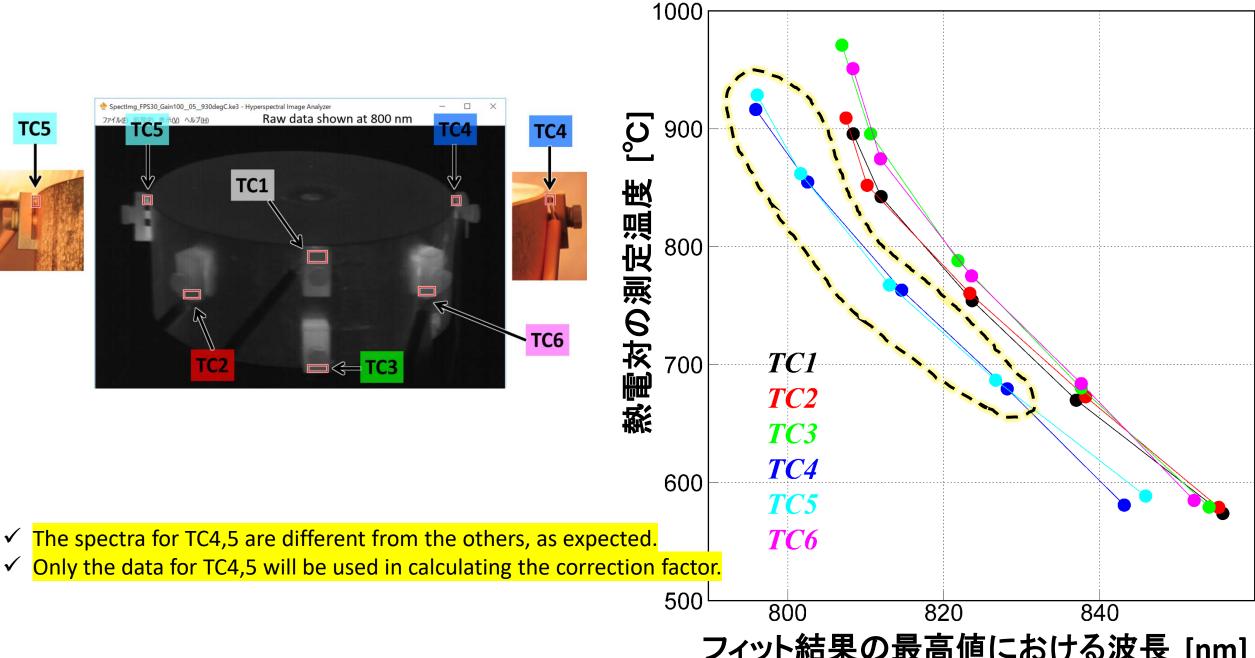


Peak position (λ_p) by fitting the observed spectrum with an <u>asymmetric gaussian</u>



After subtracting background spectrum with

- ✓ No beam irradiation
- ✓ Temperature of the copper block < 100 degC
 </p>
- ✓ Cathode voltage ON (120 kV)



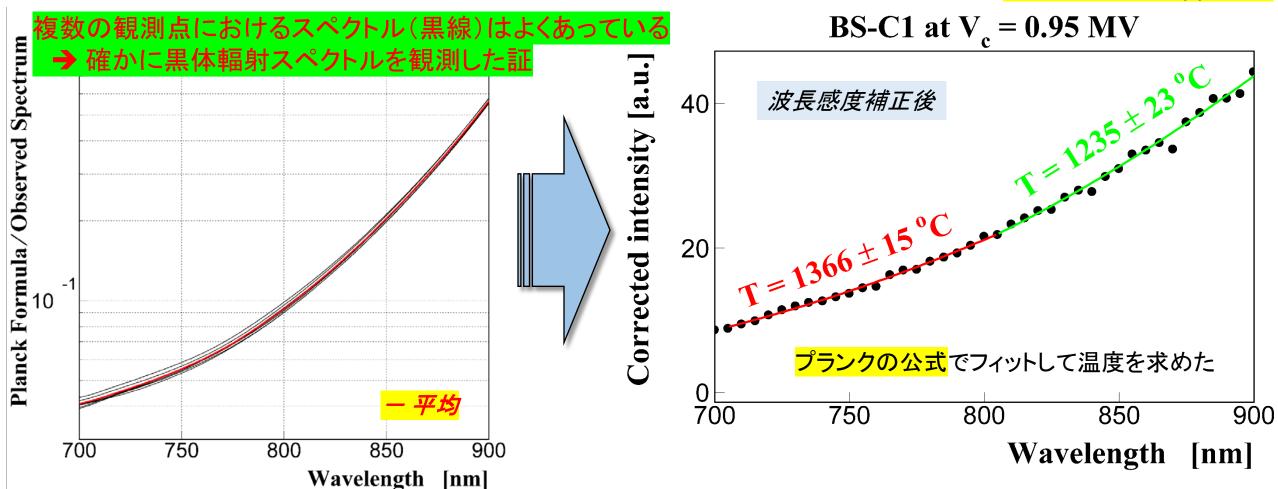
フィット結果の最高値における波長 [nm]

物理スペクトルと温度

温度のわかっている高温物体からの黒体輻射 スペクトルの測定とプランクの公式との比

プランクの公式(黒体輻射スペクトル) ∝

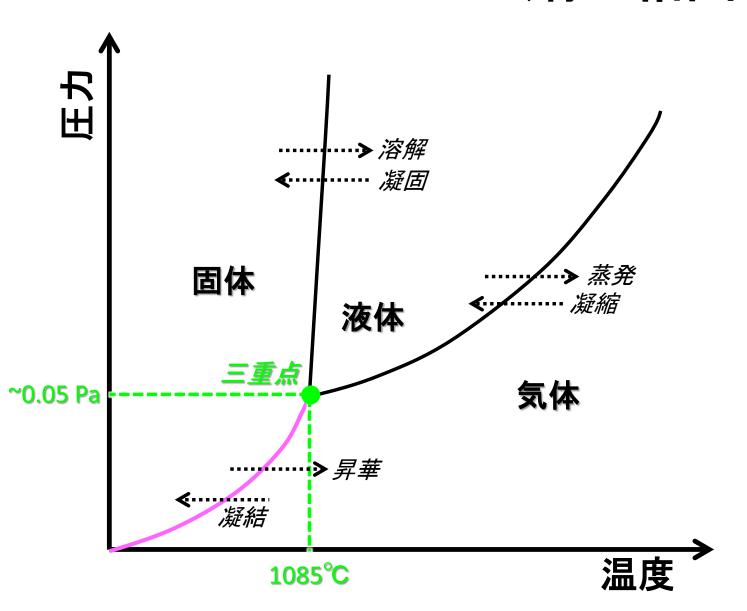
 $\frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1}$

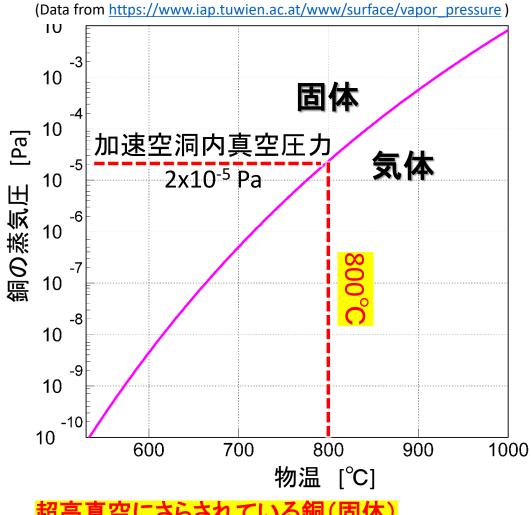


輝点の測定温度[°C] @ V_c = 0.95 MV (700~800 nmの波長域を使用)

上流側の端板 下流側の端板 **BS-C1** BS-A4 1366 ± 15 1028 ± 23 BS-A5 1316 ± 38 全て1000℃以上! BS-A1 1207 ± 13 **BS-C2** 最高温度:約1400℃! 1182 ± 43 BS-A6 1349 ± 37 BS-A2 1440 ± 20 **BS-C3** 1250 ± 33 **BS-A3 BS-A7** 1155 ± 45 1057 ± 22

銅の相図





超高真空にさらされている銅(固体) は1000℃以上にはなれない!

輝点の発光体は銅ではない!

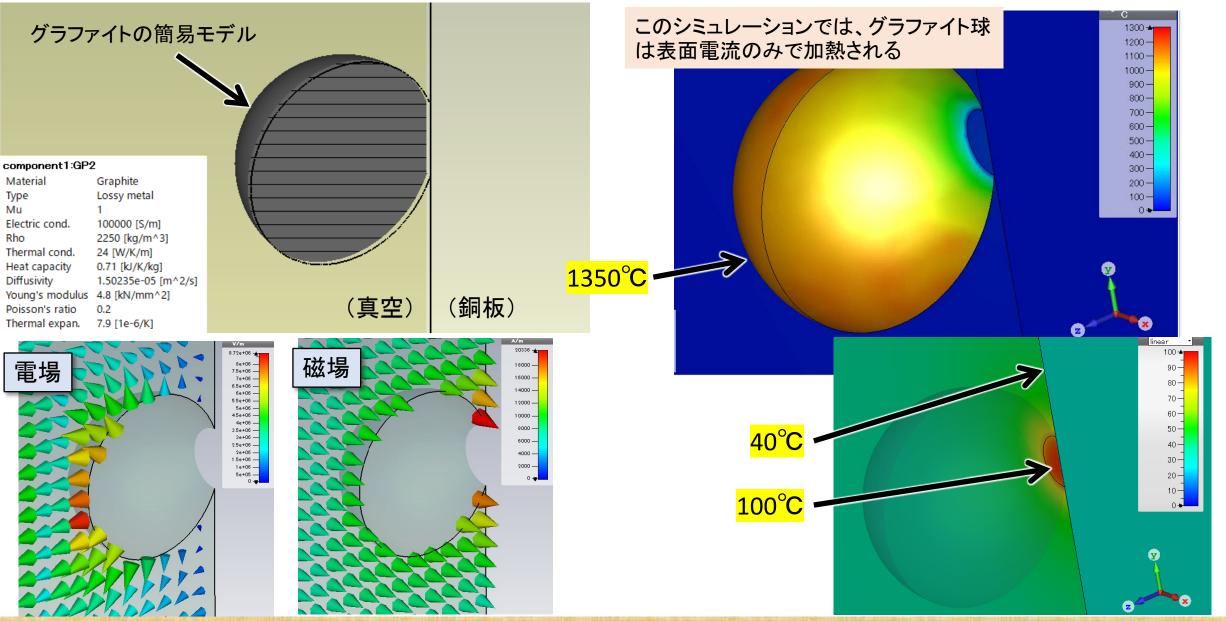
疑問と答え

- 1. 「輝点」な何者か?
 - 発光スペクトルは?
 - 熱輻射スペクトル
 - 温度は?
 - <mark>1000°C以上</mark>(10個の輝点@Vc=0.95MV)
 - 最高観測温度:約1400°C

なぜ爆発するのか?については、不明

輝点の発光体は銅ではなく、高い融点を持つ異物微粒子

CST MPHYSICS STUDIO を使った簡易シミュレーション例



まとめ

- ハイパースペクトルカメラを使って、(ブレークダウンの引き金の「種」である)常時発光輝点のスペクトルを初めて測定した。
 - 熱輻射スペクトルであった。
 - 温度は、1000°C以上@空洞電圧: 0.95 MV(=加速電界: 3.7 MV/m)
 - 輝点の発光体は銅ではなく、高い融点を持つ異物微粒子(炭素やモリブデン等が候補) と判明

輝点は、 これまでは単なる「背景」



真空中で爆発してブレークダウンを引き起こす高温異物微粒子

まとめ

- ハイパースペクトルカメラを使って、(ブレークダウンの引き金の「種」である)常時発光輝点のスペクトルを初めて測定した。
 - 熱輻射スペクトルであった。
 - 温度は、1000°C以上@空洞電圧: 0.95 MV(=加速電界: 3.7 MV/m)
 - 輝点の発光体は銅ではなく、高い融点を持つ異物微粒子(炭素やモリブデン等が候補) と判明



- 次ステップ
 - 輝点爆発の瞬間のスペクトル測定
 - ▶ 輝点の発光体の構成元素特定なるか?

ご清聴、ありがとうございました

- ➤ 本研究成果の論文は Physical Review Accelerators and Beams 誌への掲載が決定しました:
 - T. Abe et al., "Direct observation of breakdown trigger seeds in a normal-conducting RF accelerating cavity", Physical Review Accelerators and Beams (2018)
 - ➤ 論文雑誌のホームページ: https://journals.aps.org/prab/
- ▶ 本研究は、SuperKEKB 陽電子ダンピングリング用加速空洞の大電力試験に寄生する形で行いました
- ▶ 本研究は、以下の支援を受けました:
 - ① 科学研究費補助金/基盤研究(B)(課題番号:15H03671)
 - ② KEK機械工学センター/製造支援