

加速空洞内部の直接観察による ブレークダウン引き金機構の解明研究

阿部 哲郎、影山 達也、坂井 浩、竹内 保直、吉野 一男

高エネルギー加速器研究機構(KEK)／加速器研究施設

第15回日本加速器学会年会@ハイブ長岡

2018年8月8日

本研究の目的

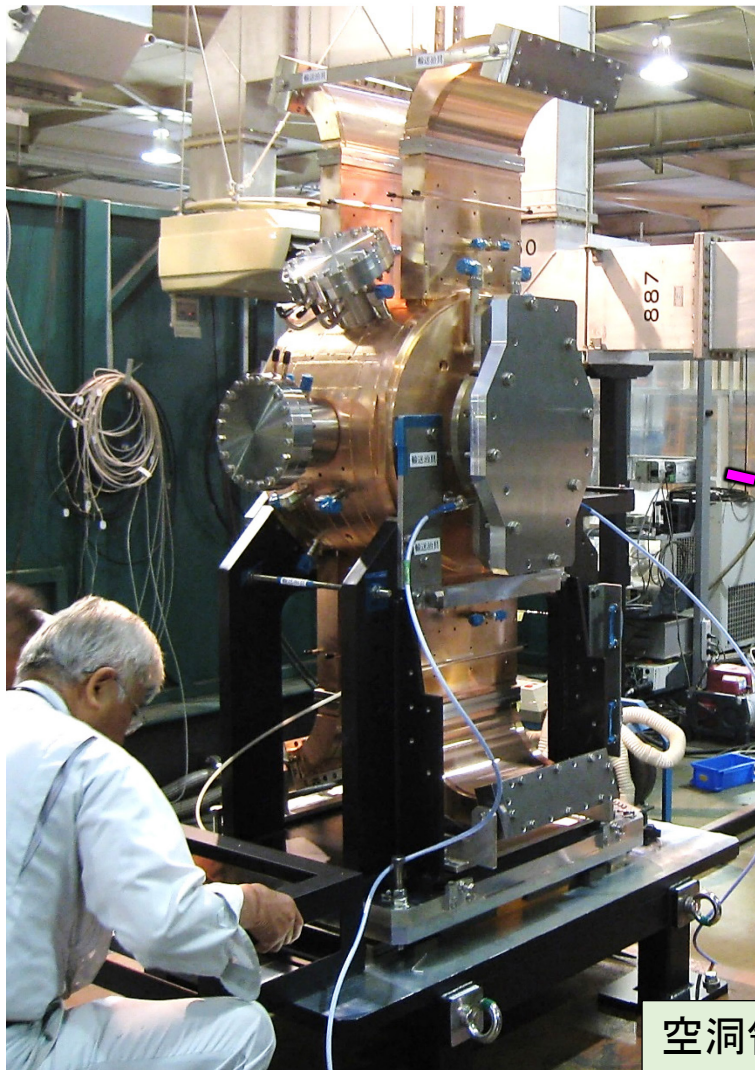
常伝導高周波加速構造の真空ブレークダウンの引き金機構を解明

→ 加速構造の性能向上への応用

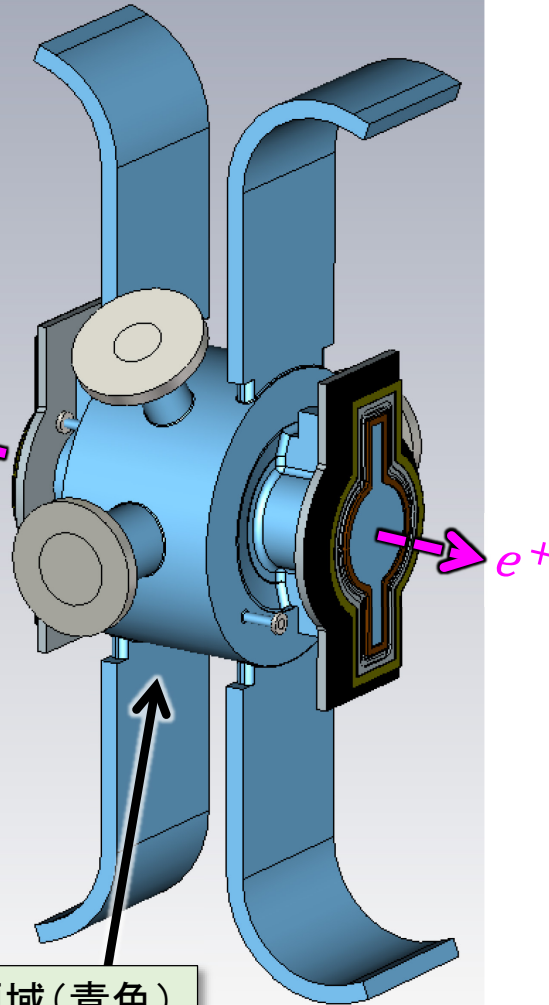
→ 加速構造の性能劣化に対する回復への応用

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)



空洞領域(青色)



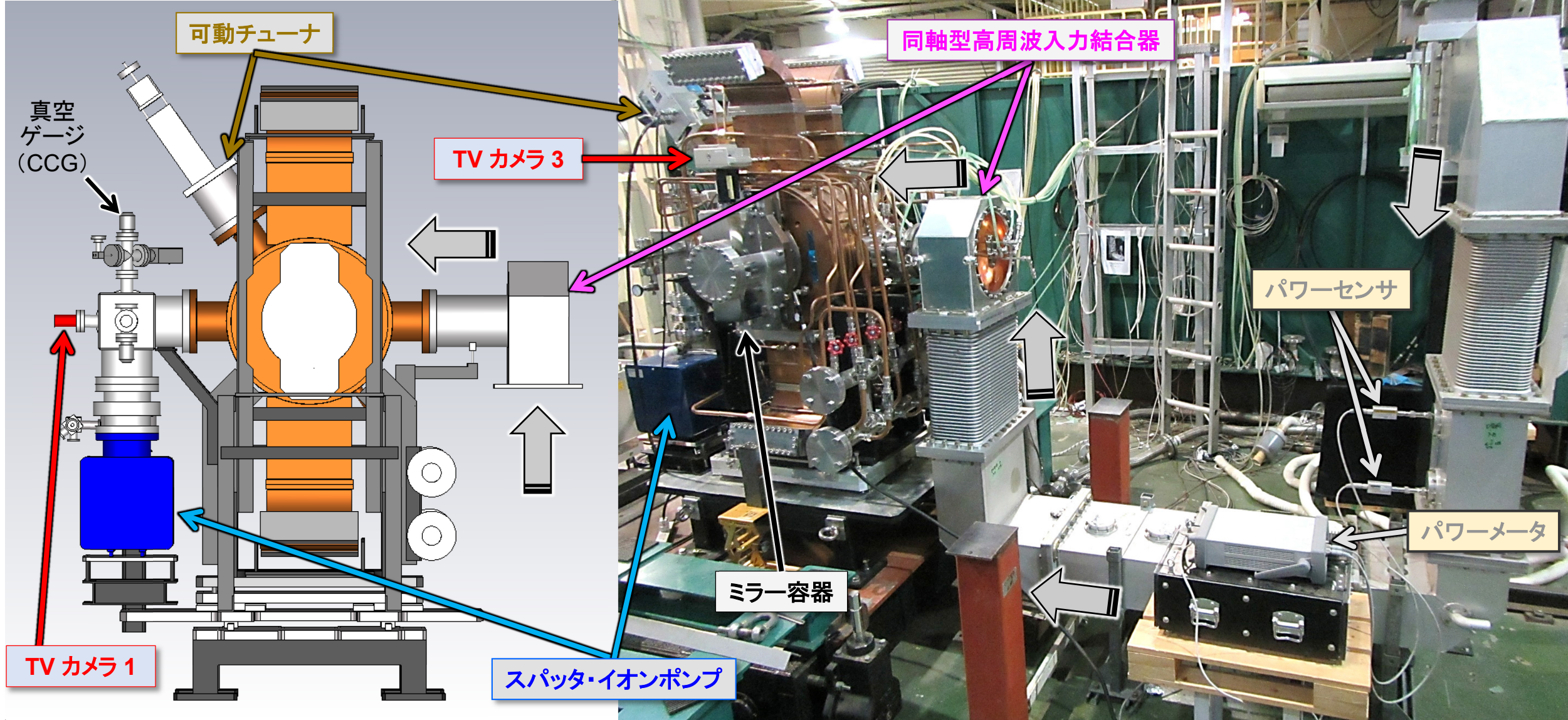
- 加速モード: 509 MHz CW TM_{010}
- 材料: 無酸素銅クラス1
- $Q_0 = \sim 29000$ (93% IACS)
- $R_{sh}/Q_0 = 150 \Omega$
- 空洞電圧(定格): $V_c = 0.80$ MV
→ $E_{acc} = 3.1$ MV/m
- 壁面損失電力: 約146 kW (@ $V_c = 0.80$ MV)

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>

大電力テスト・スタンドにおけるセットアップ



本研究の方法

加速空洞内部を直接観察し、ブレイクダウンの瞬間を視覚的にとらえる

- ブレイクダウンの結果発生する「2次的・間接的」信号に依らない
- TVカメラを使って3方向から空洞内部を常時直接観察

TVカメラ2

直接観察のセットアップ

同軸型入力結合器

TVカメラ3

入力高周波

ピックアップアンテナ

上流側ミラー

下流側ミラー

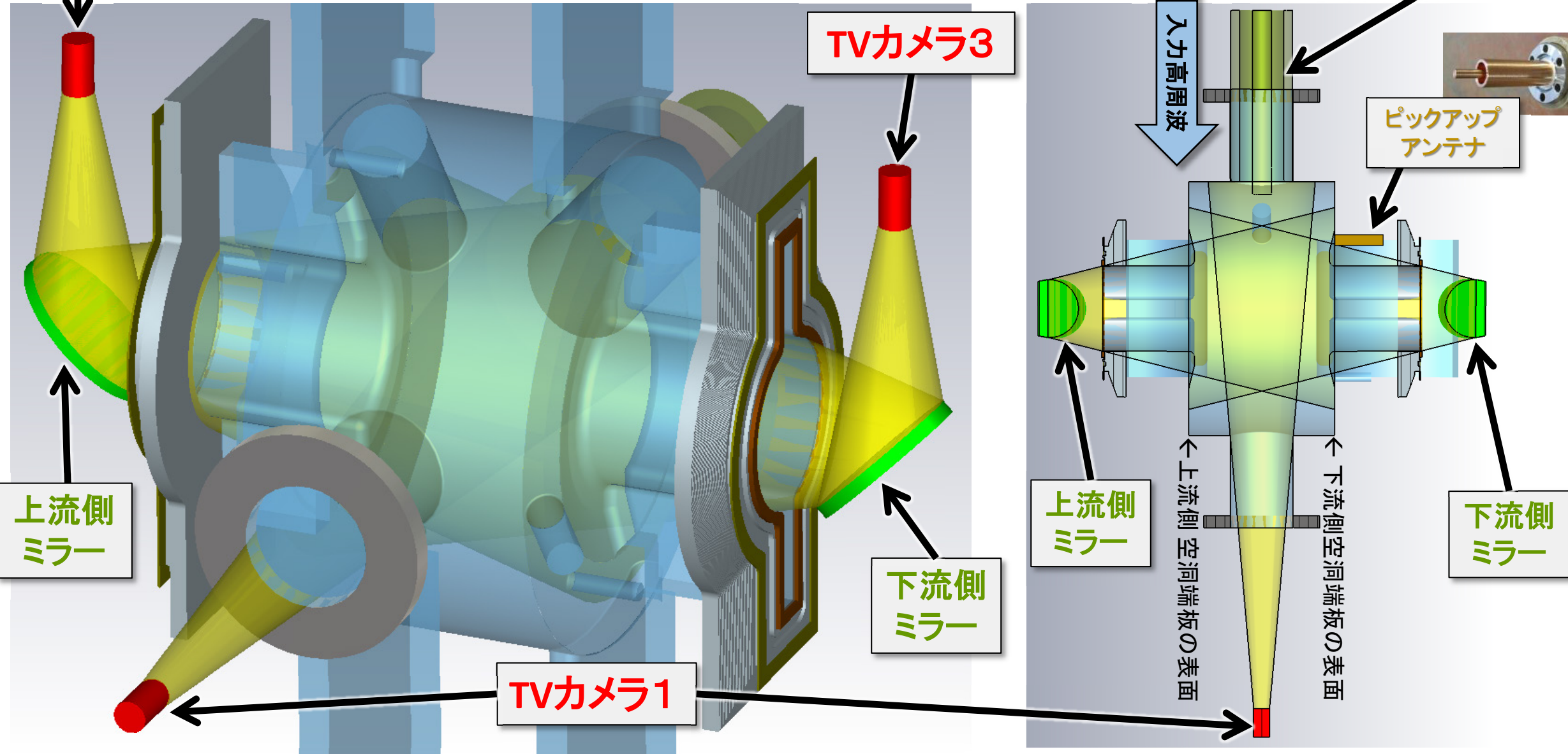
上流側ミラー

下流側ミラー

TVカメラ1

上流側空洞端板の表面

下流側空洞端板の表面



ブレークダウンの瞬間の観測例1

巨大放電!

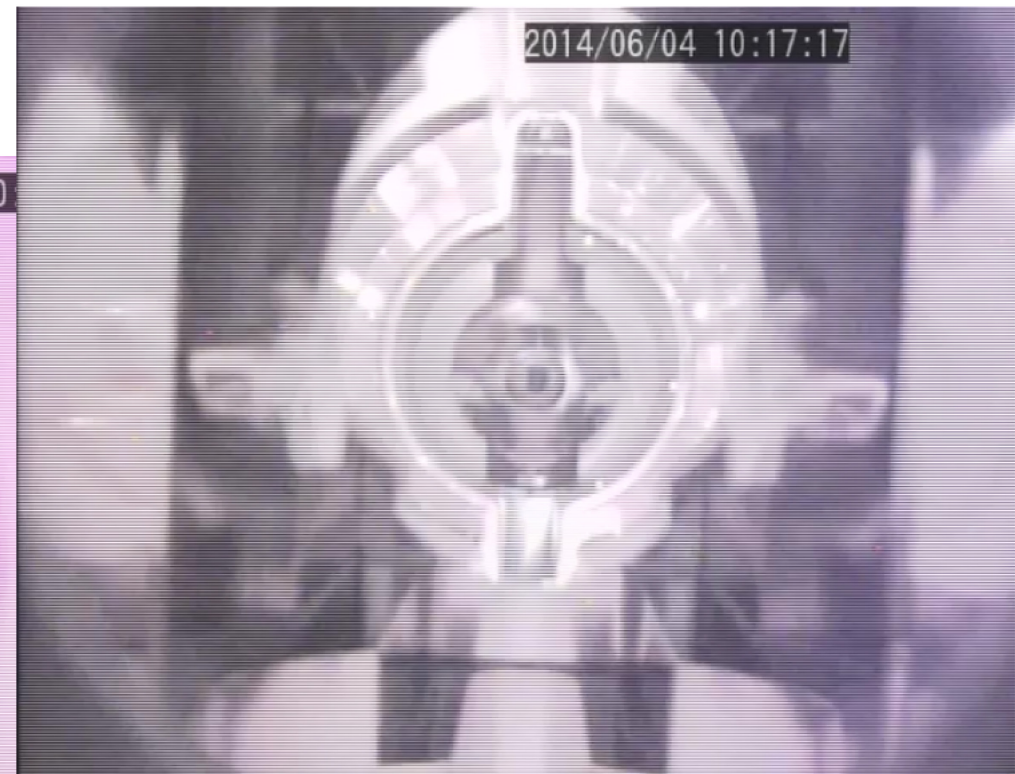
$$V_c = 0.89 \text{ MV} (E_{\text{acc}} = 3.5 \text{ MV/m})$$



上流側の端板



側面(サイドビュー)

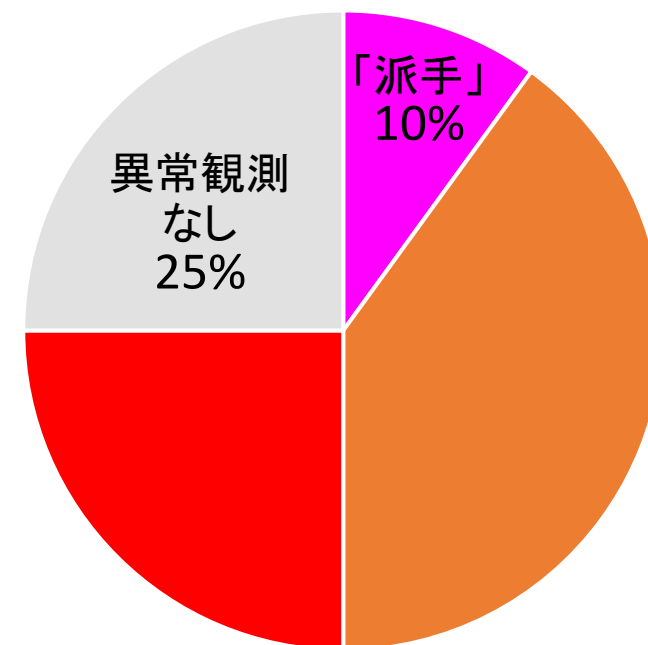


下流側の端板

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

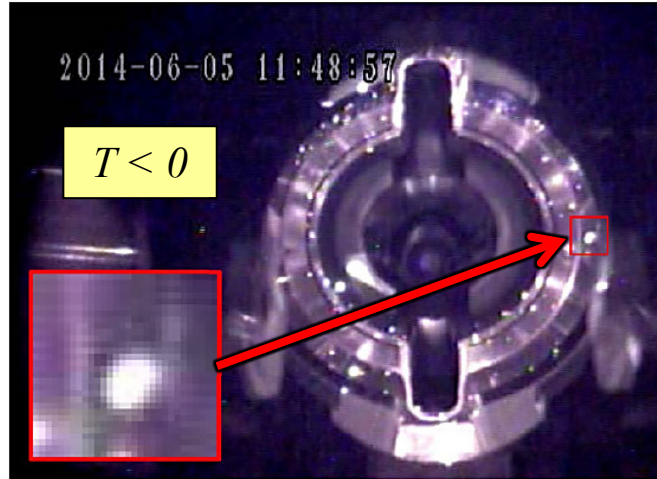
- RFコンディショニングの初期でのみ発生



ブレークダウンの瞬間の観測例2

常時発光輝点

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



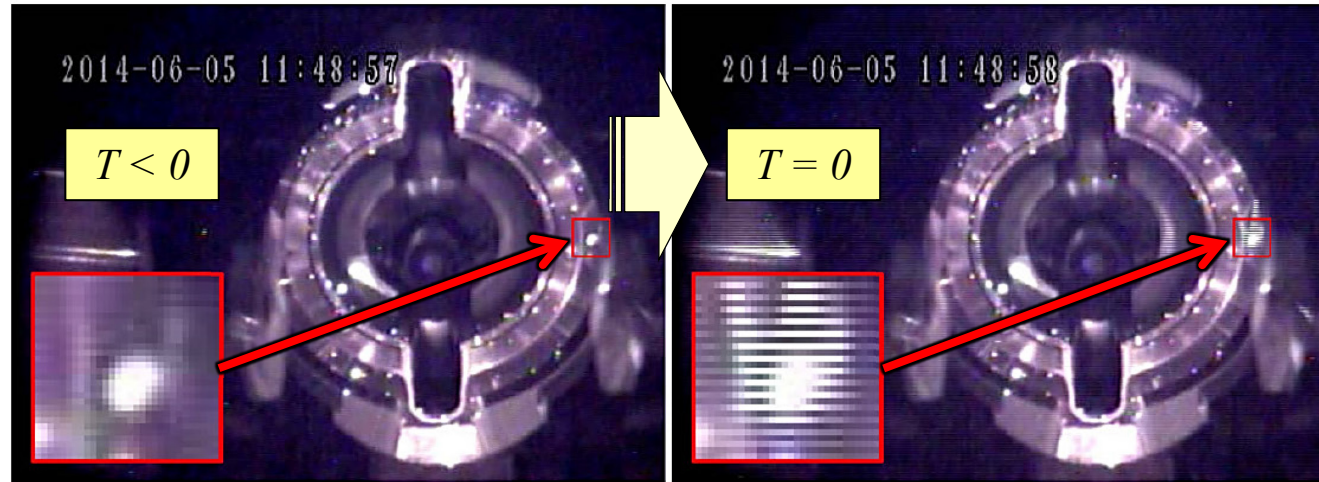
(a) 1 frame (1/30 s) before this cavity breakdown.

ブレークダウンの瞬間の観測例2

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



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

(b) At the moment of this cavity breakdown.

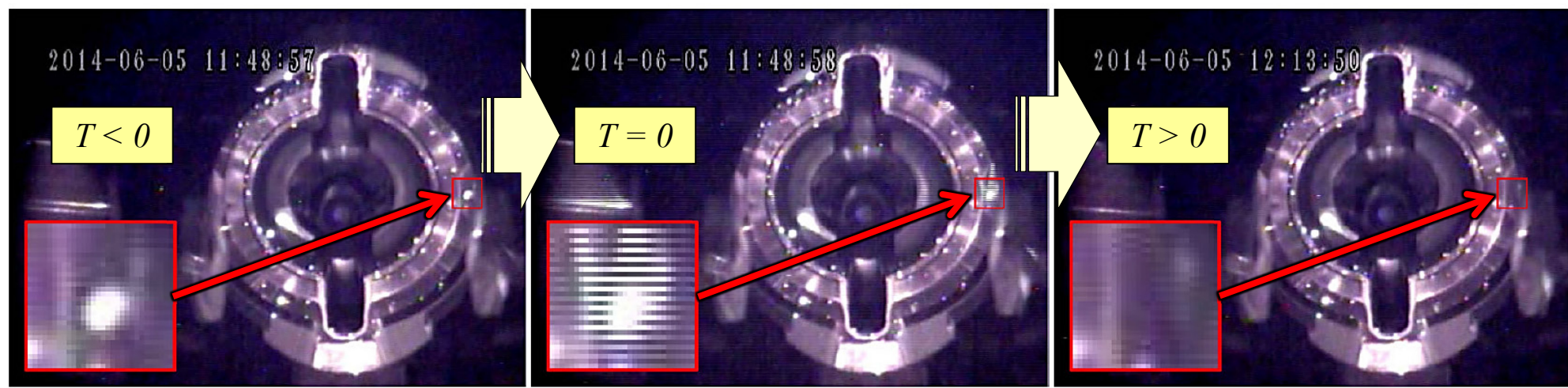
ブレークダウンの瞬間の観測例2

ミニ超新星爆発！

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

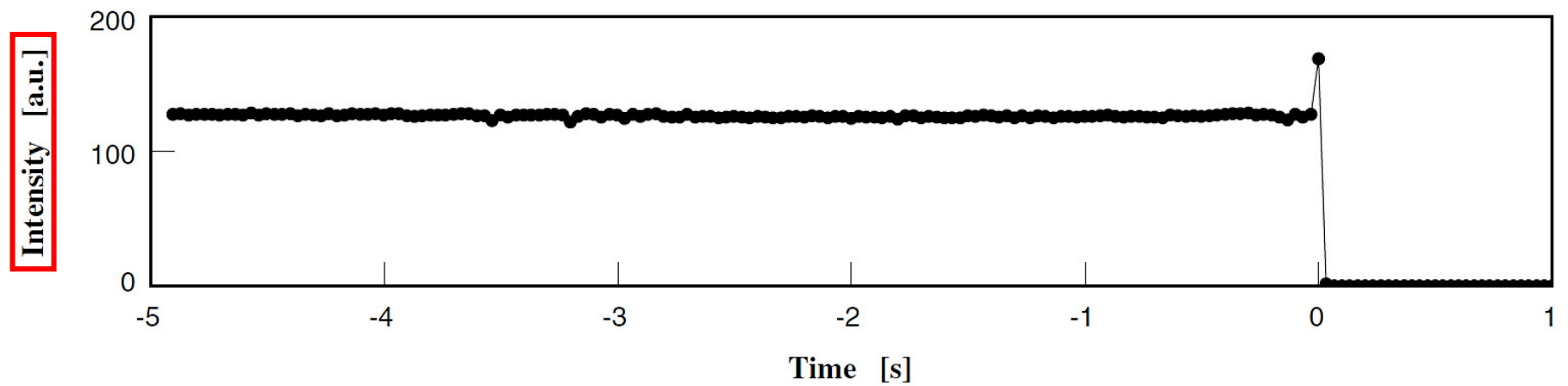
その後、その輝点はない！



(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.

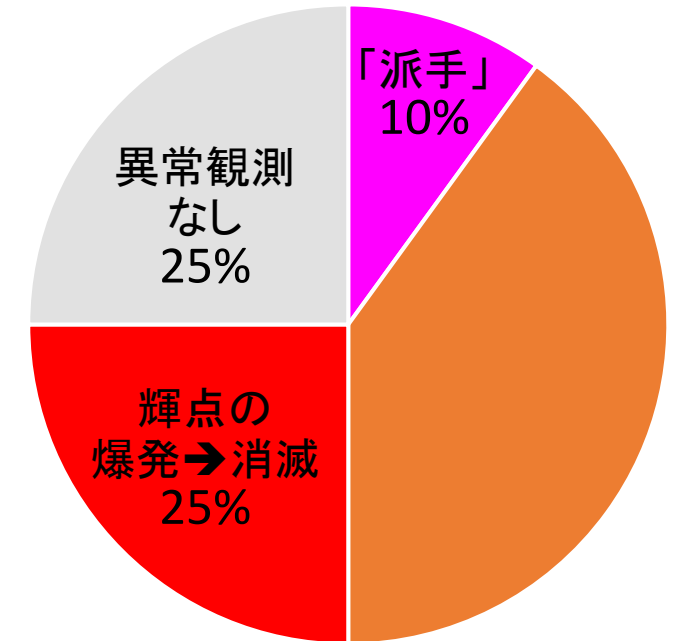


全205回のブレークダウン事象の内訳

■ 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」



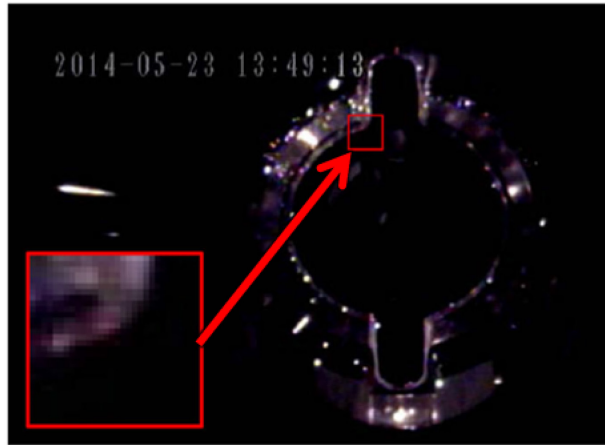
ブレークダウンの瞬間の観測例3

常時発光輝点のない箇所でのスポット型爆発

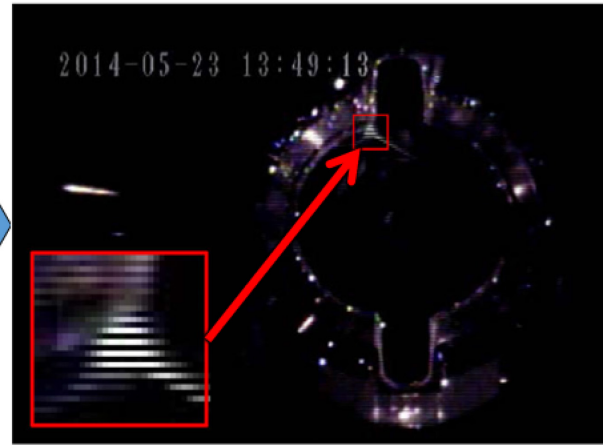
この領域に常時発光輝点なし
($V_c = 0.65$ MV ($E_{acc} = 2.5$ MV/m))

ブレークダウンの瞬間に
スポット型爆発が発生！

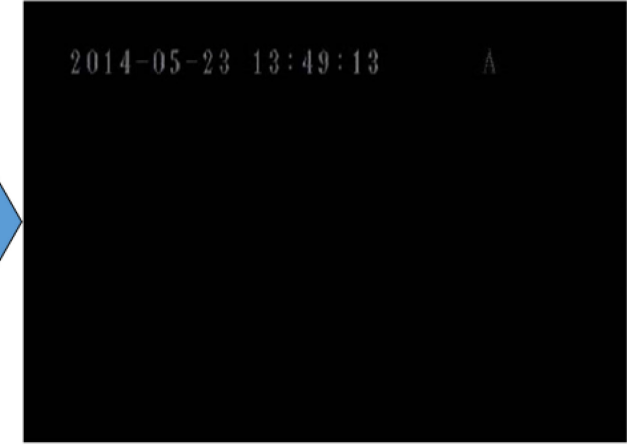
ダウン



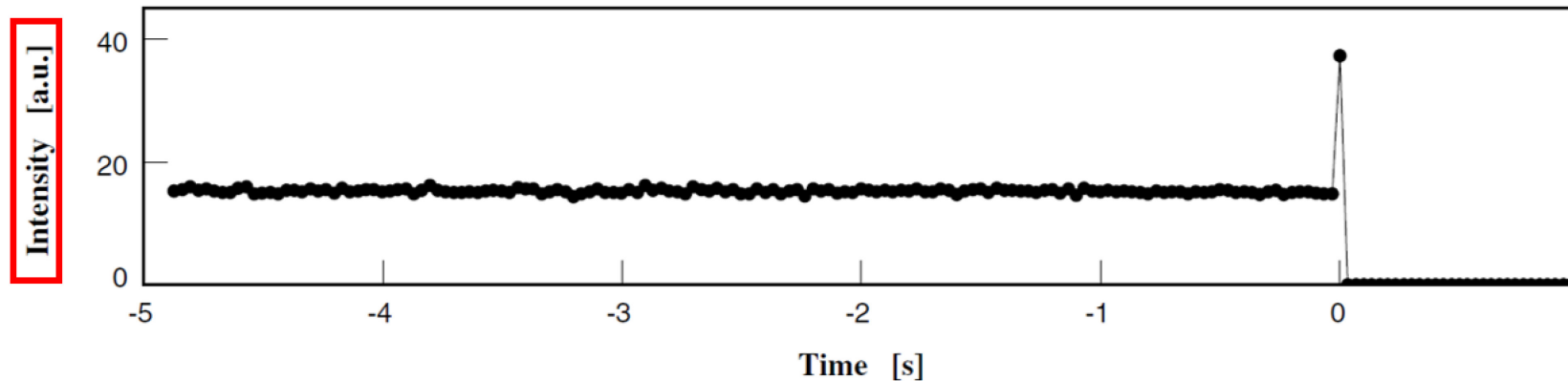
(a) 1 frame (1/30 s) before this cavity breakdown.



(b) At the moment of this cavity breakdown.



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



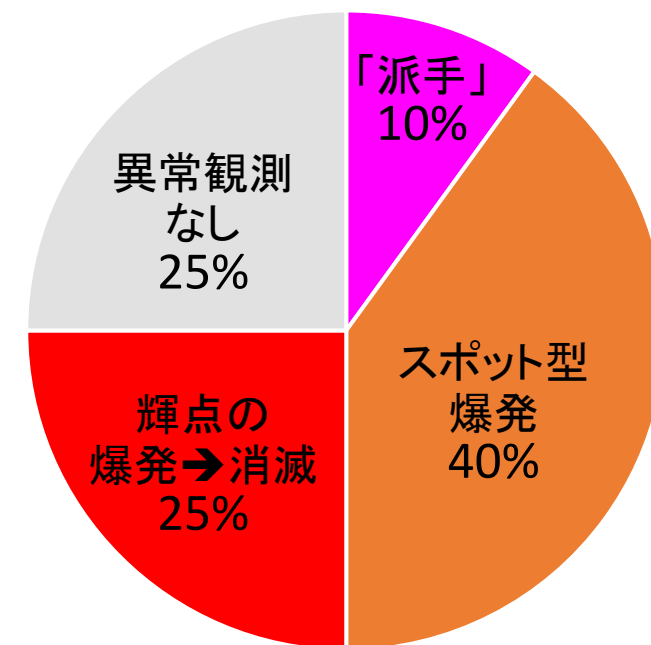
全205回のブレークダウン事象の内訳

■ 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

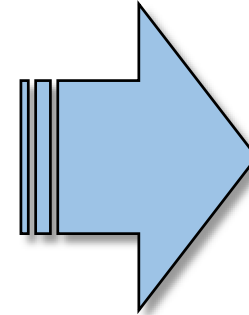
- 詳しくは→
- ✓ 阿部 哲郎、「高周波加速空洞のブレークダウンの瞬間を「見た」!」、KEK 加速器研究施設トピックス 2016/10/5 (Web記事): <http://www2.kek.jp/accl/topics/topics161005.html>
 - ✓ T. Abe, T. Kageyama, H. Sakai, Y. Takeuchi, and K. Yoshino, "Breakdown Study Based on Direct In-Situ Observation of Inner Surfaces of an RF Accelerating Cavity during a High-Gradient Test", [Physical Review Accelerators and Beams](https://doi.org/10.102001/2016) **19**, 102001 (2016).

ここからが今回の発表内容 (新しい結果)

疑問？

1. 「輝点」は何者か？

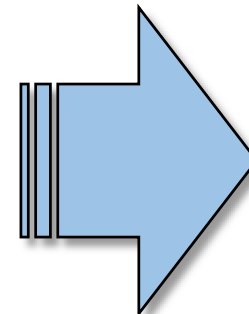
- 発光スペクトルは？
- 温度は？
- なぜ爆発するのか？



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

2. 「スポット型爆発」はどのようにして発生するのか？

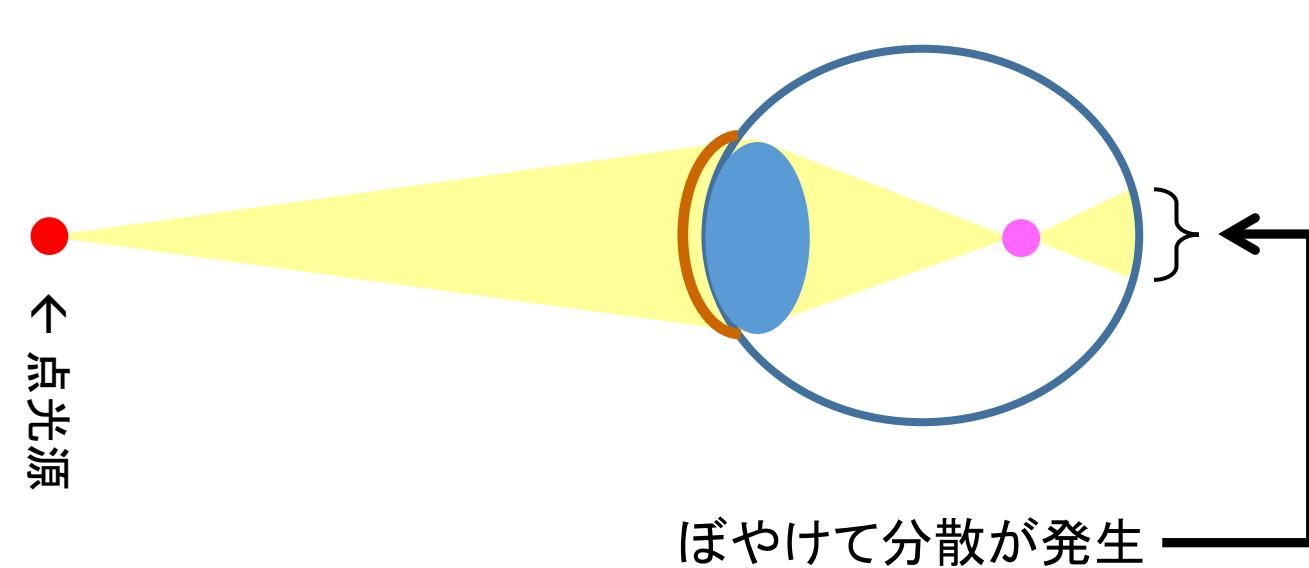
- 輝点の「生成→成長→爆発」が高速で起きるのか？



ハイスピード・カメラを使っ
て爆発の瞬間を観測

ハイパースペクトル・カメラを 使った輝点のスペクトル測定

焦点が受光素子面から少しでも外れていると、



- 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
- 空洞内の輝点のスペクトル測定には、**2次元分光**が必要

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

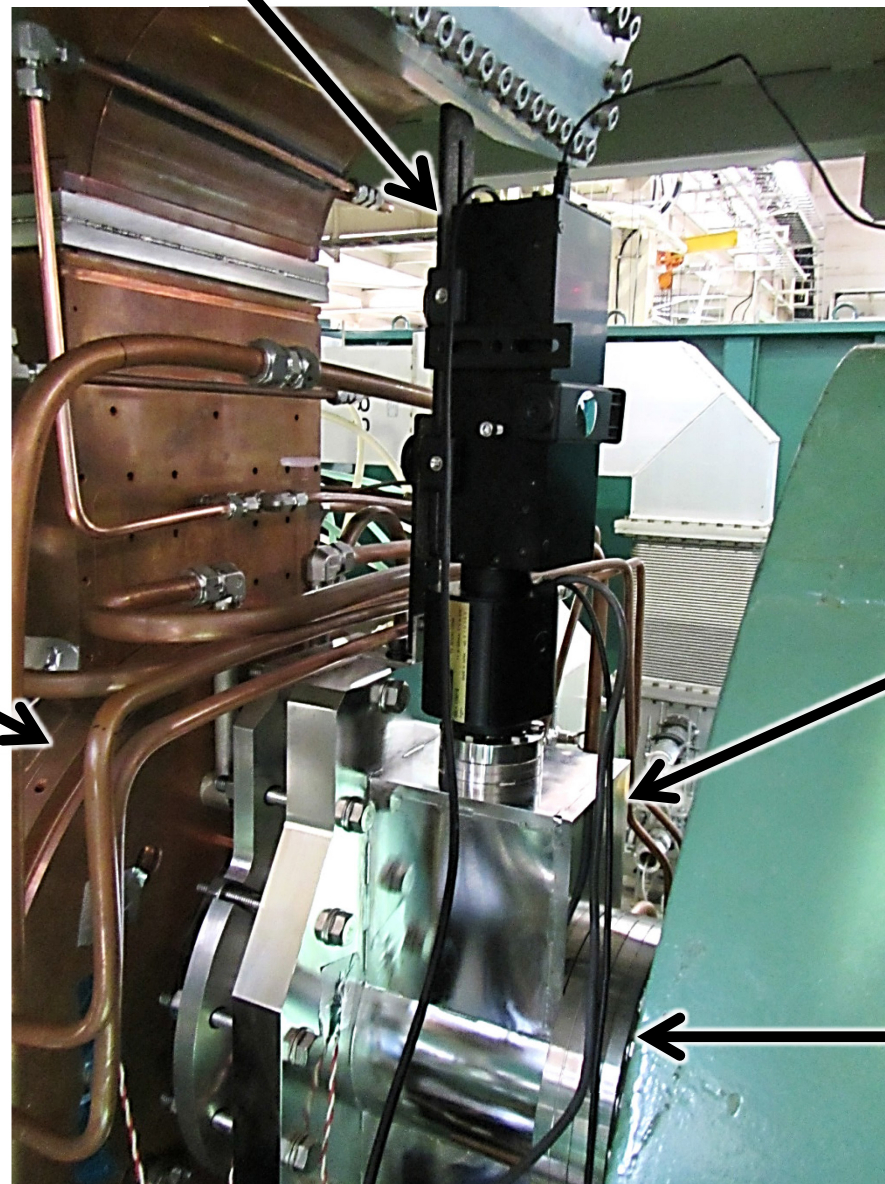
<https://ebajapan.jp/spectraltechnology/>



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

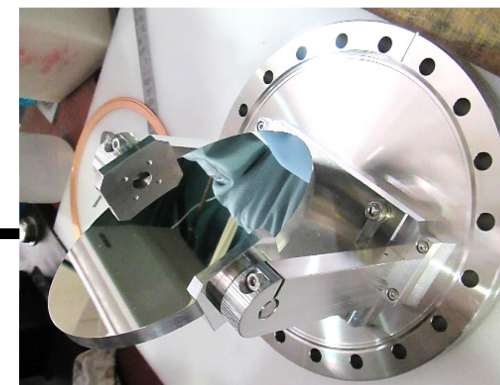
ハイパースペクトル・カメラのセットアップ

加速空洞



ミラー容器

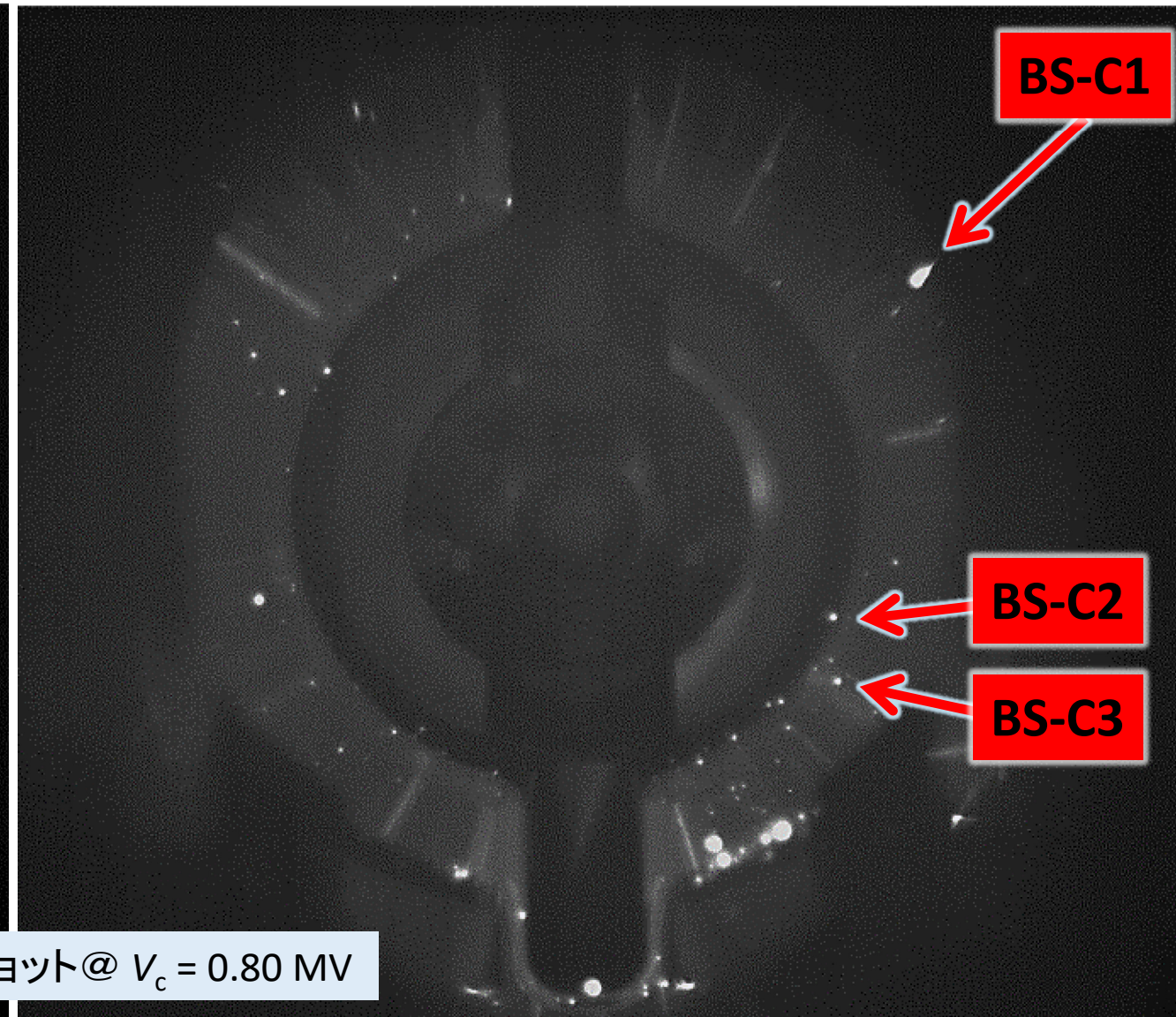
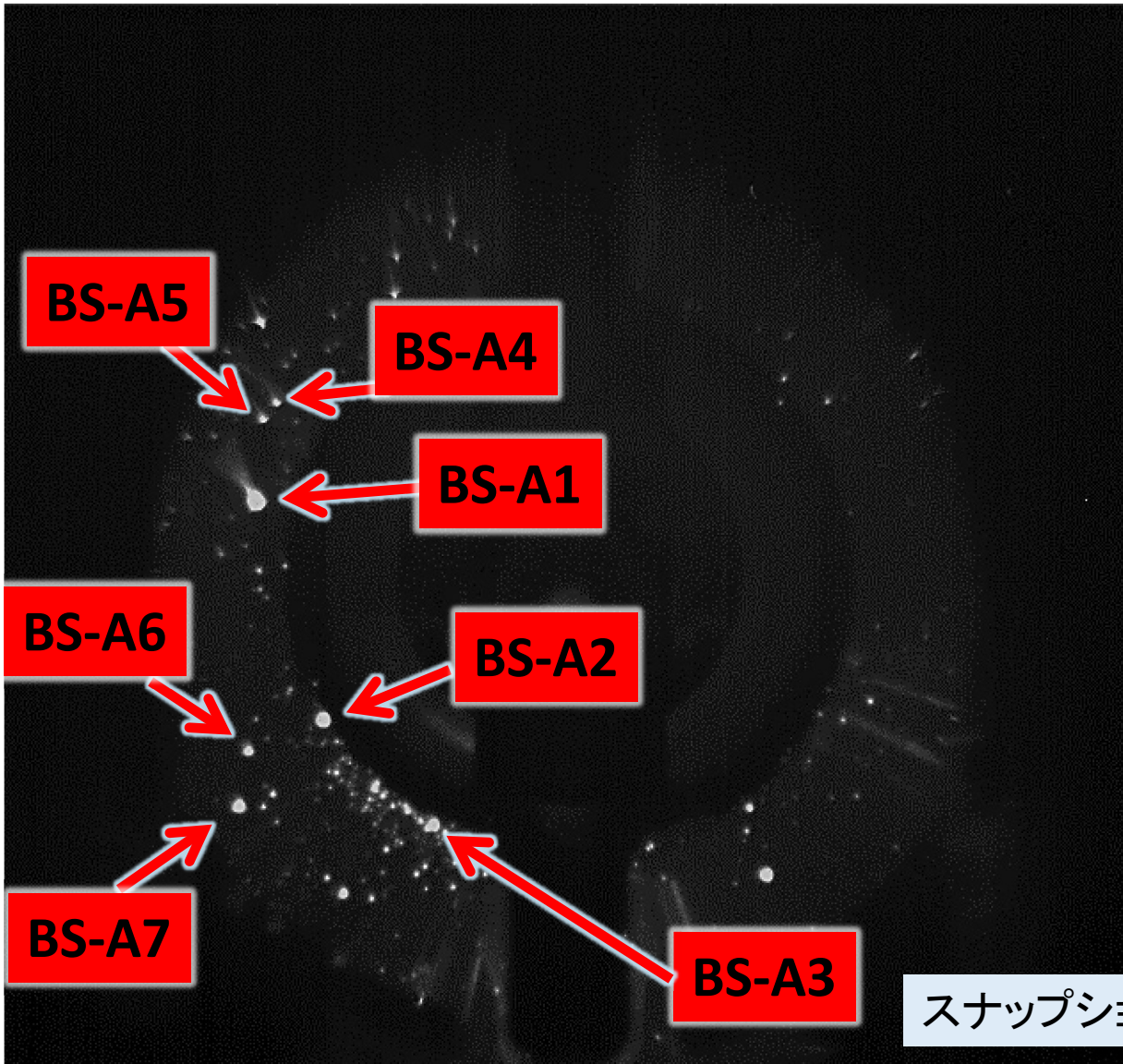
アルミ製ミラー



10個の常時発光輝点のスペクトルを測定

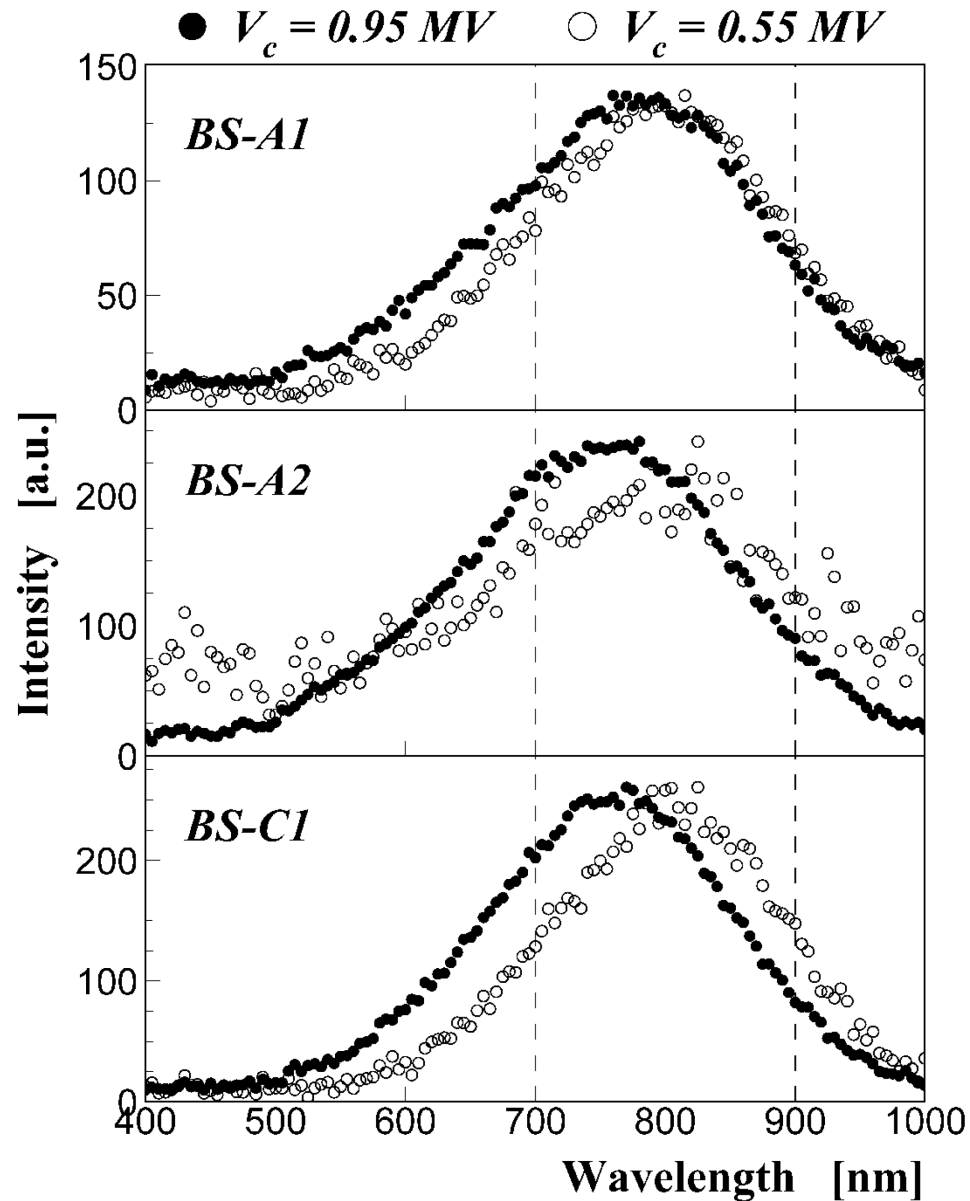
上流側の端板

下流側の端板



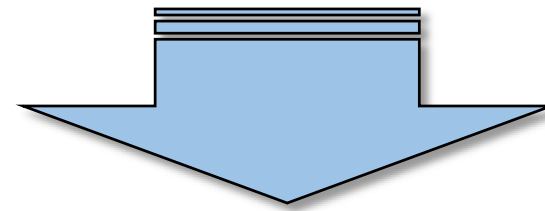
スナップショット@ $V_c = 0.80$ MV

観測スペクトル



- ✓ 画素感度補正済み
- ✓ 絶対波長校正済み
- ✓ ミラー容器の補正済み
- ✓ バックグラウンド除去済み

- 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！

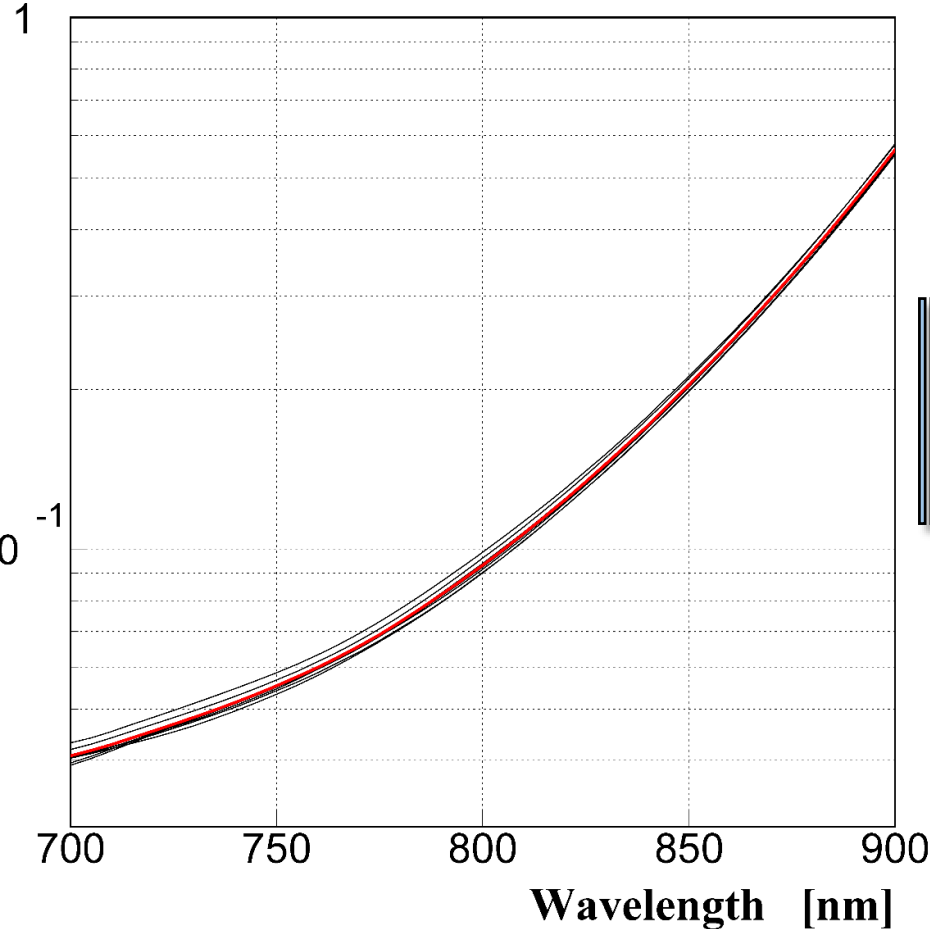
物理スペクトルと温度

温度のわかっている高温物体からの黒体放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(黒体放射スペクトル)

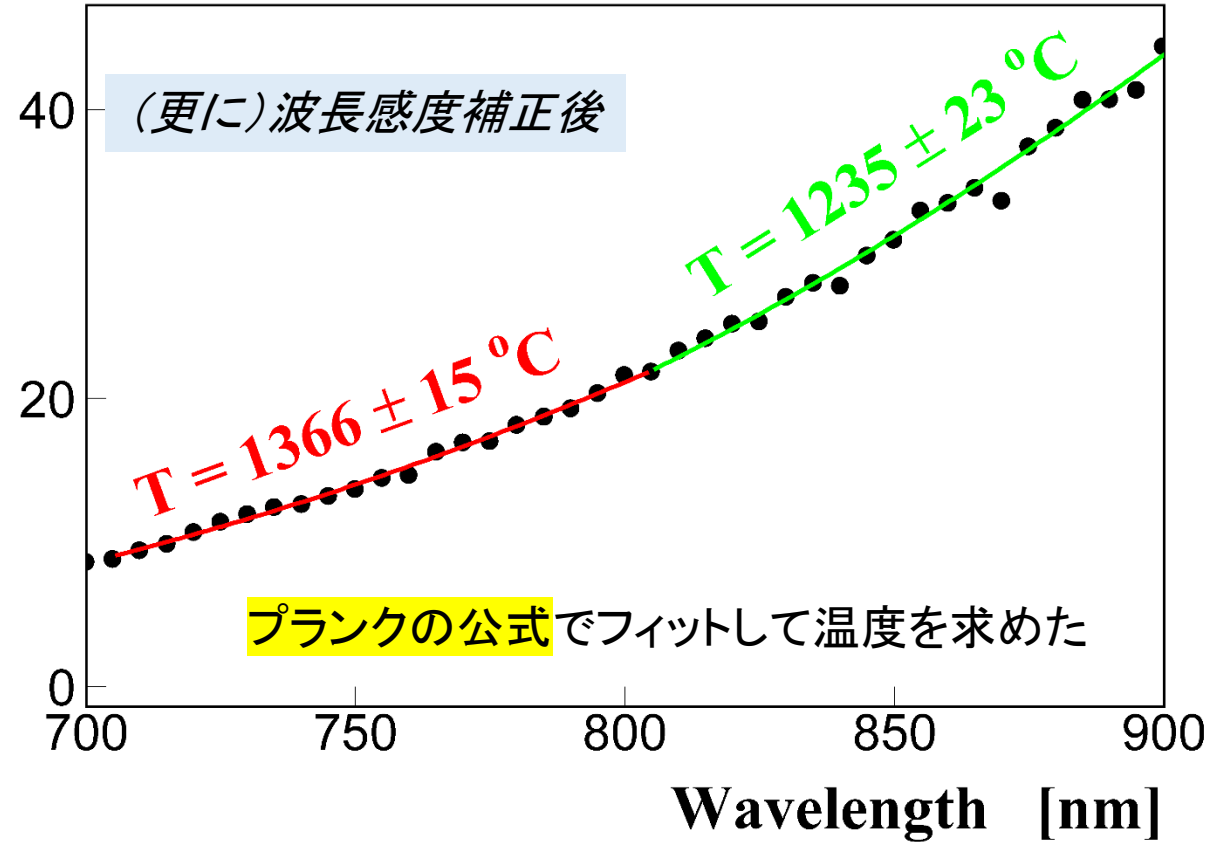
$$\propto \frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

Planck Formula / Observed Spectrum



BS-C1 at $V_c = 0.95$ MV

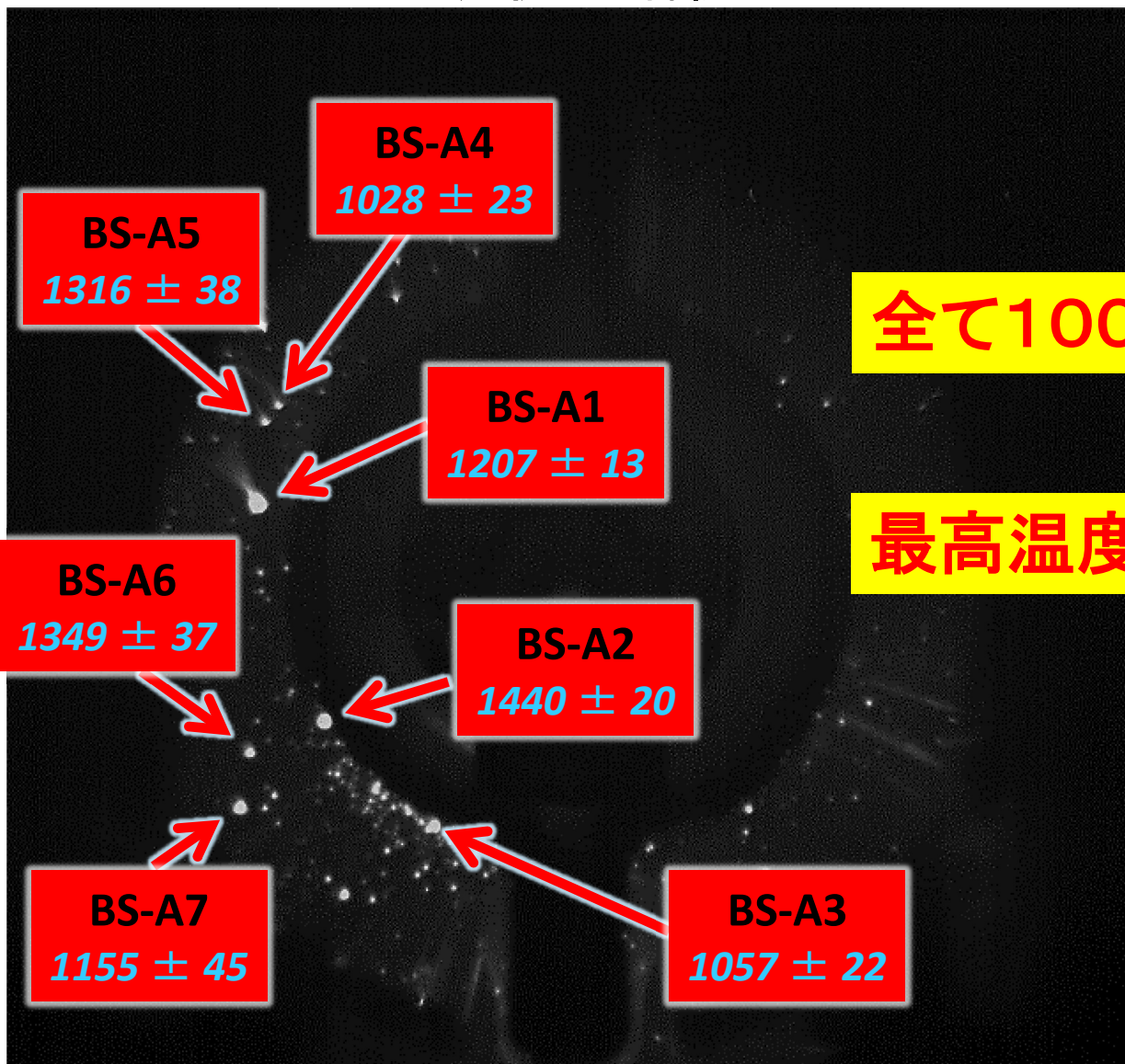
Corrected intensity [a.u.]



測定温度[°C] @ $V_c = 0.95$ MV (700 ~ 800 nm)

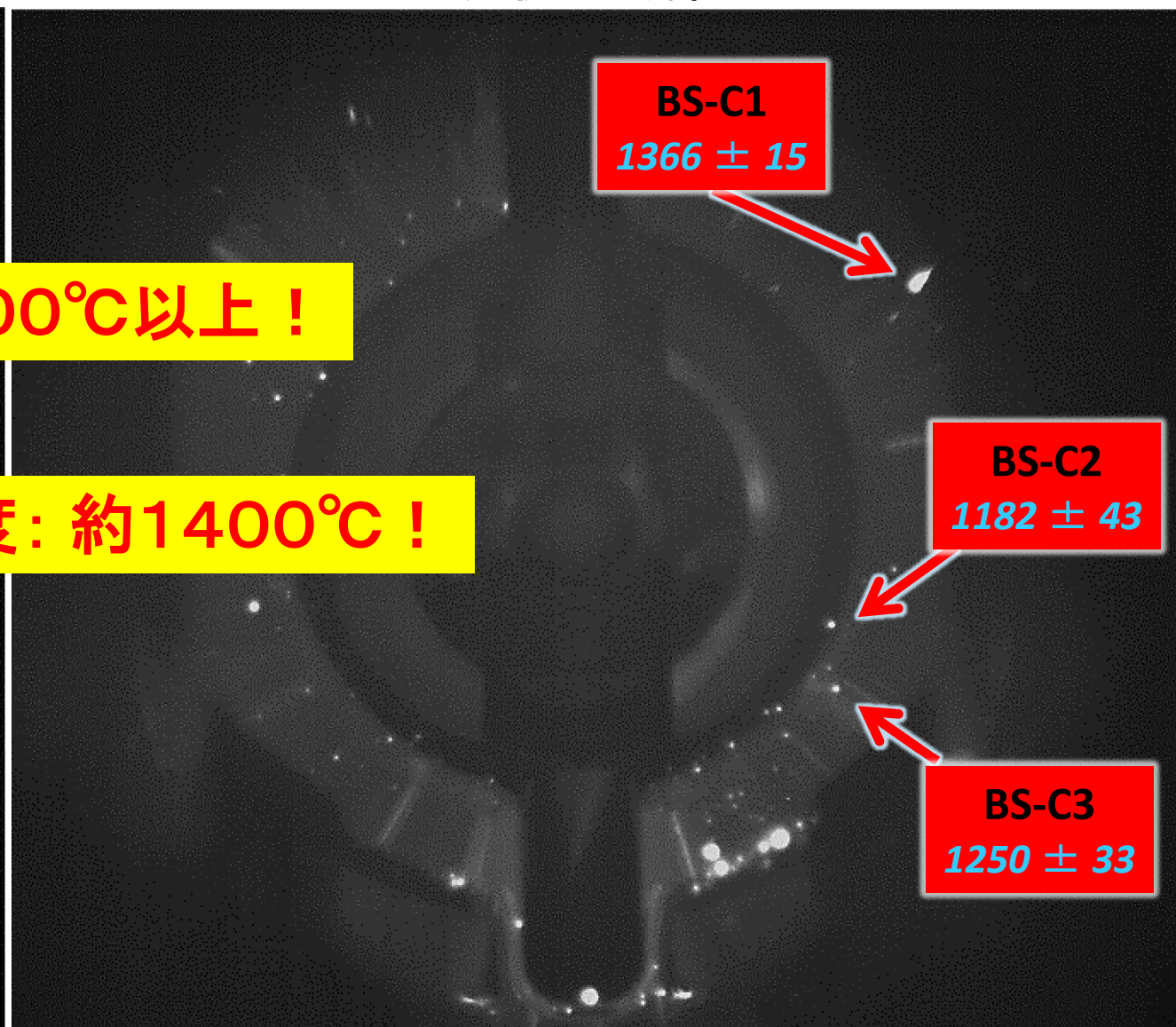
上流側の端板

下流側の端板

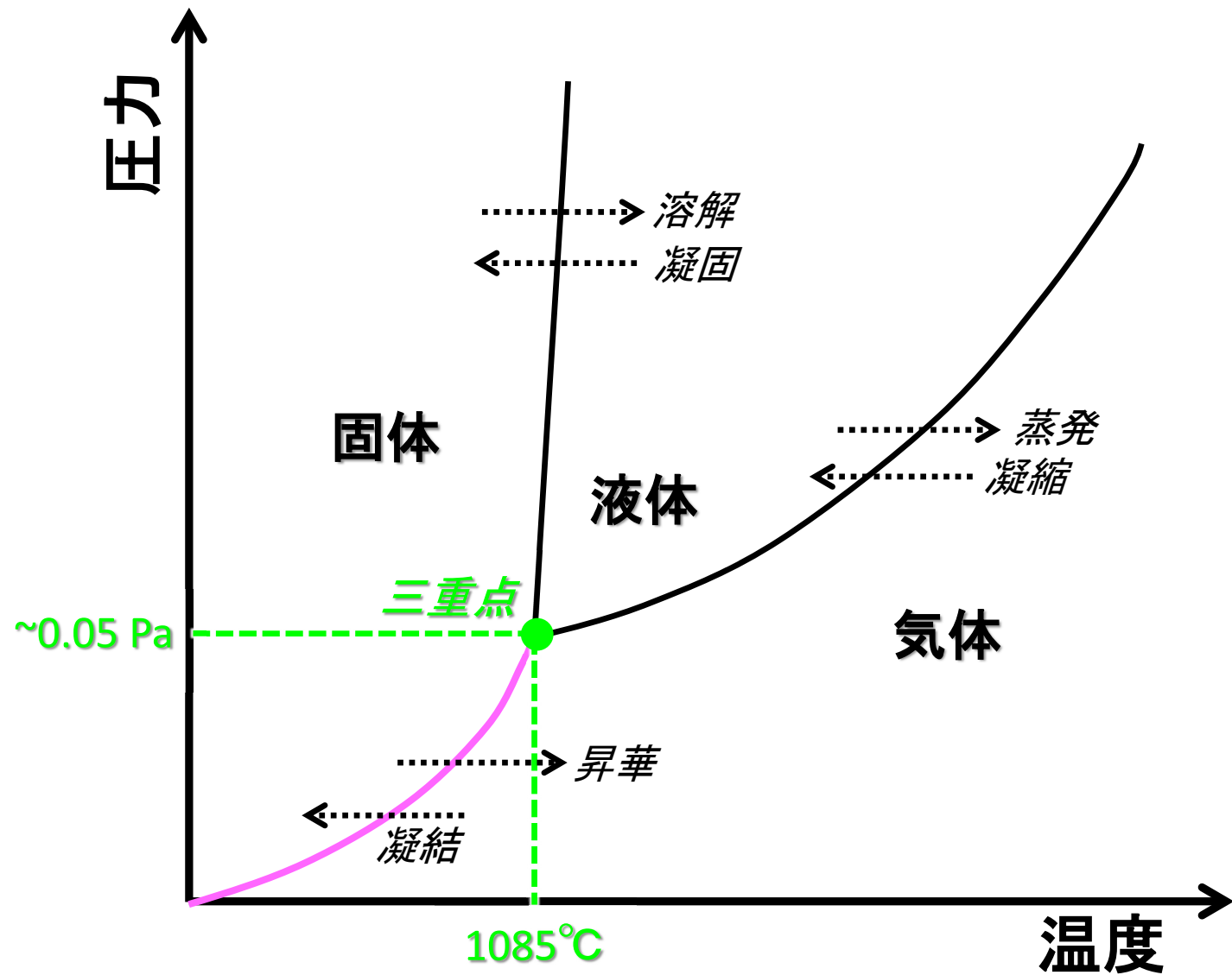


全て1000°C以上!

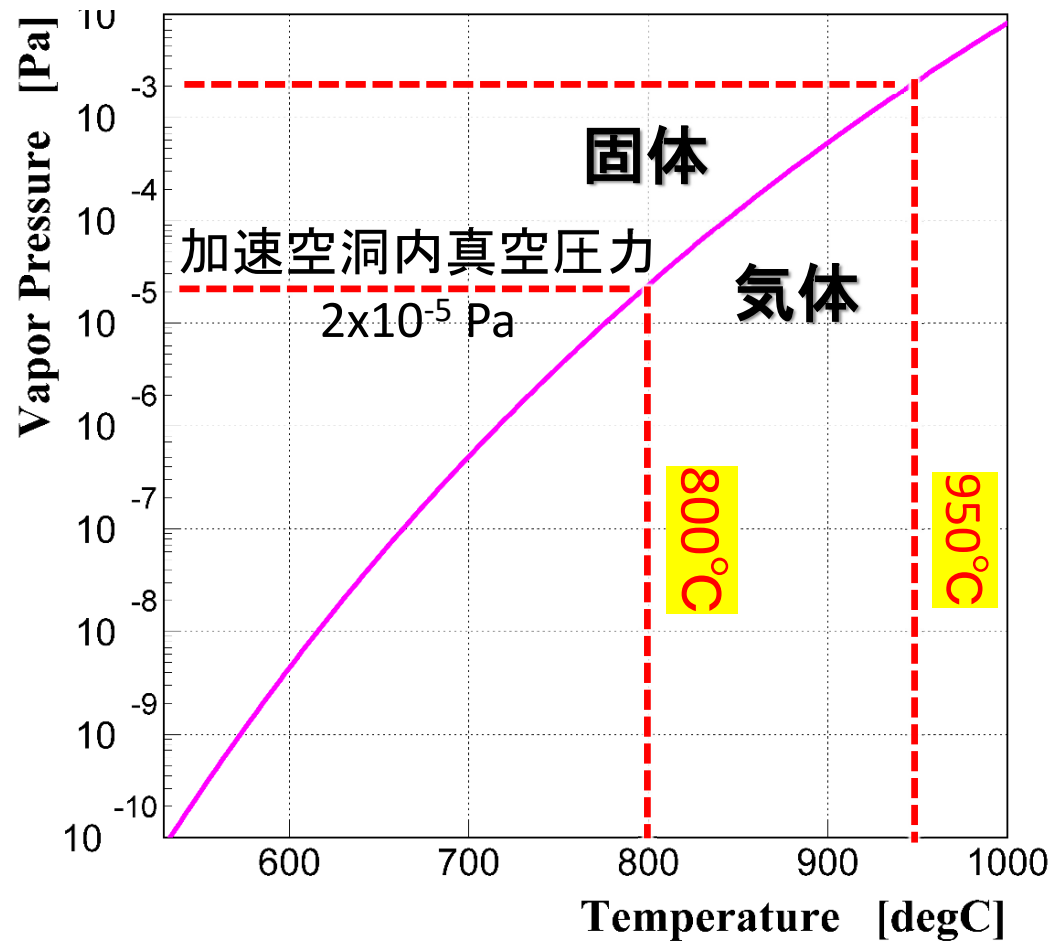
最高温度: 約1400°C!



銅の相図



(Data from https://www.iap.tuwien.ac.at/www/surface/vapor_pressure)



超高真空中にさらされている銅(固体)は 1000°C 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？

 - 1000°C以上 (10個の輝点@ $V_c=0.95\text{MV}$)

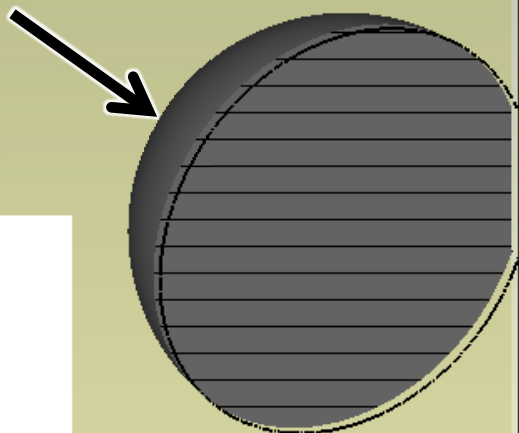
 - 最高観測温度: 約1400°C

- 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

グラファイトの簡易モデル



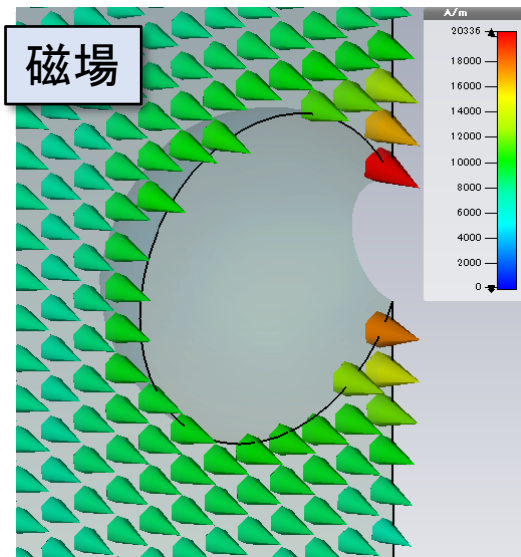
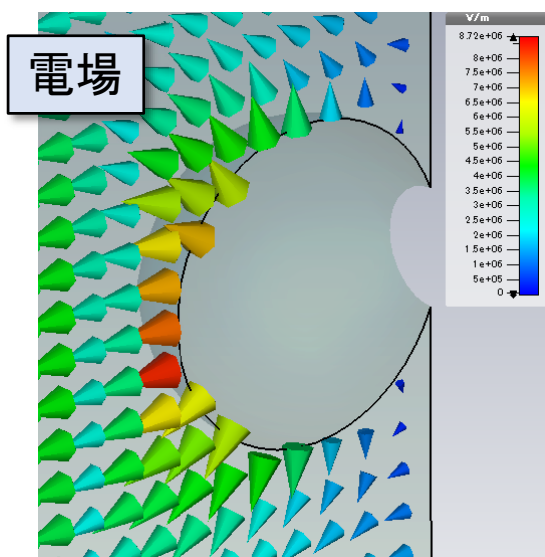
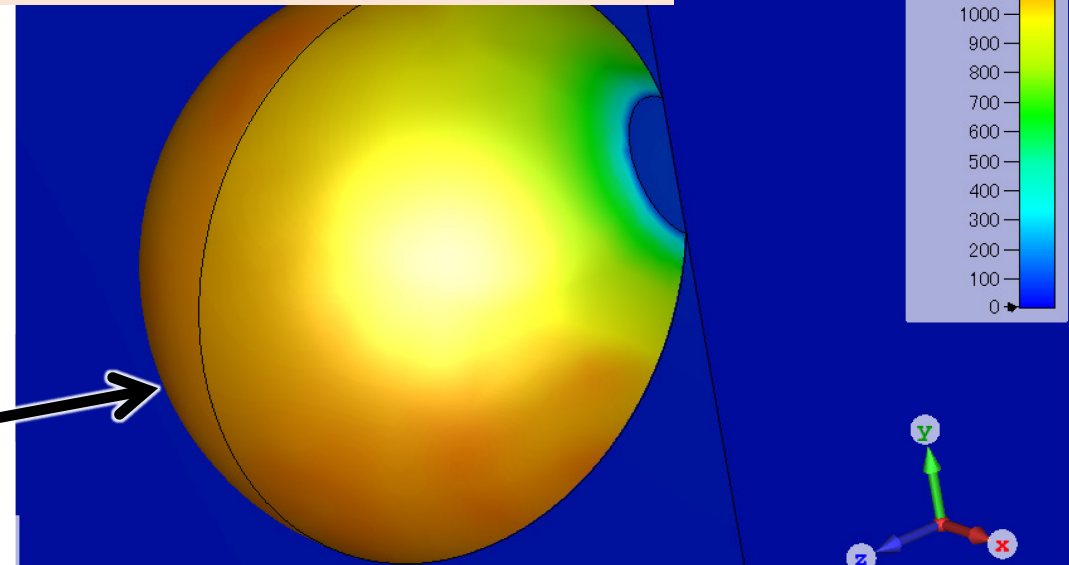
component1:GP2

Material	Graphite
Type	Lossy metal
Mu	1
Electric cond.	100000 [S/m]
Rho	2250 [kg/m ³]
Thermal cond.	24 [W/K/m]
Heat capacity	0.71 [kJ/K/kg]
Diffusivity	1.50235e-05 [m ² /s]
Young's modulus	4.8 [kN/mm ²]
Poisson's ratio	0.2
Thermal expan.	7.9 [1e-6/K]

(真空) (銅板)

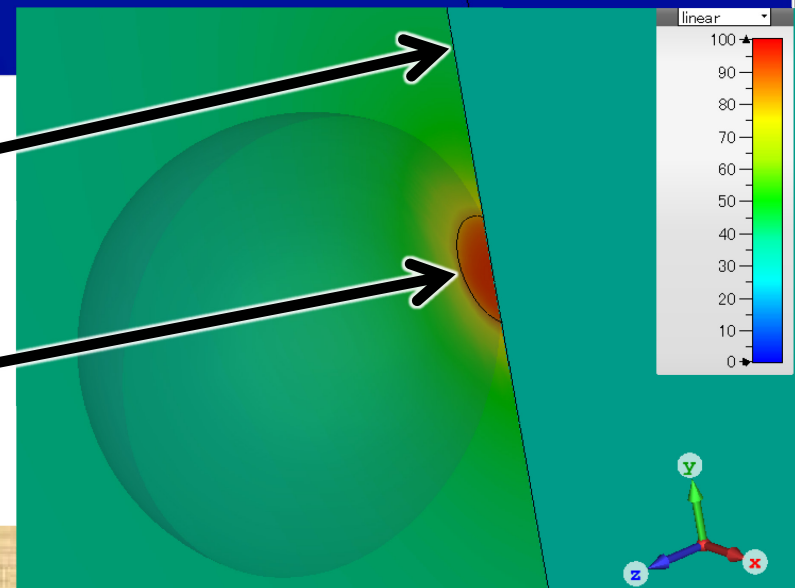
このシミュレーションでは、グラファイト球は表面電流のみで加熱される

1350°C



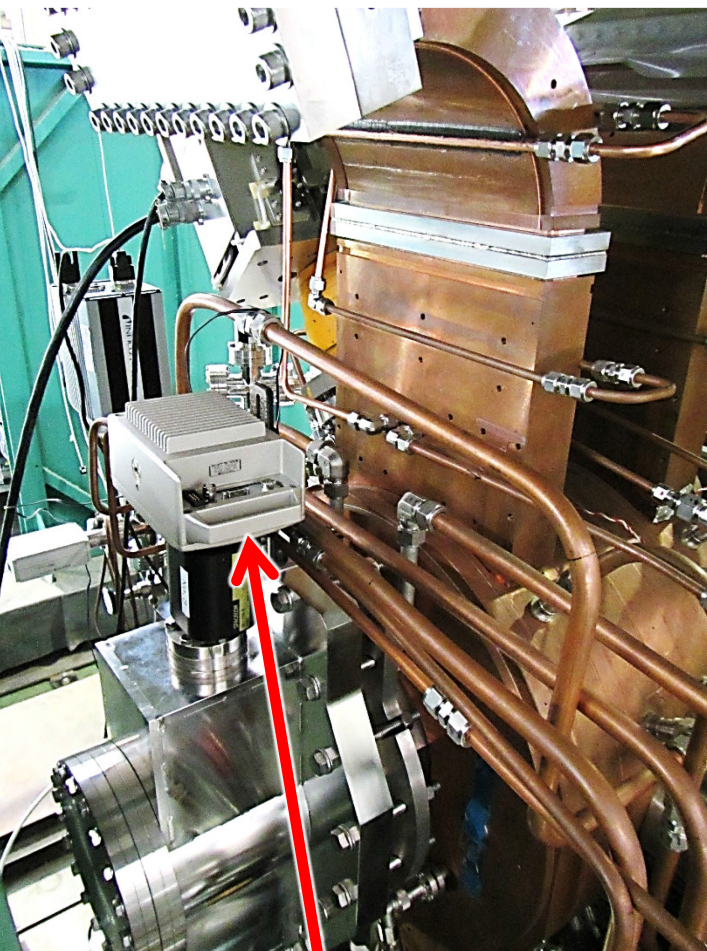
40°C

100°C

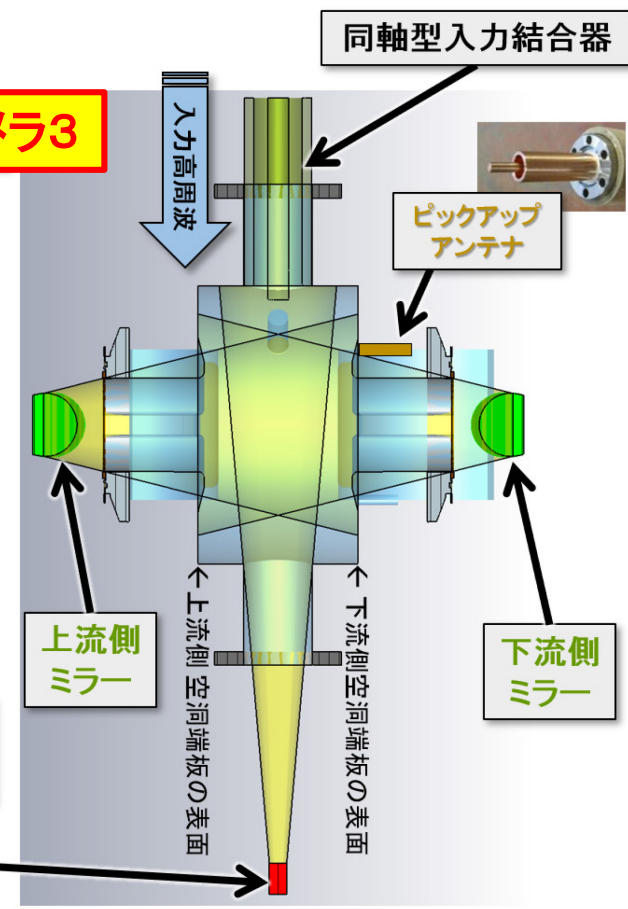
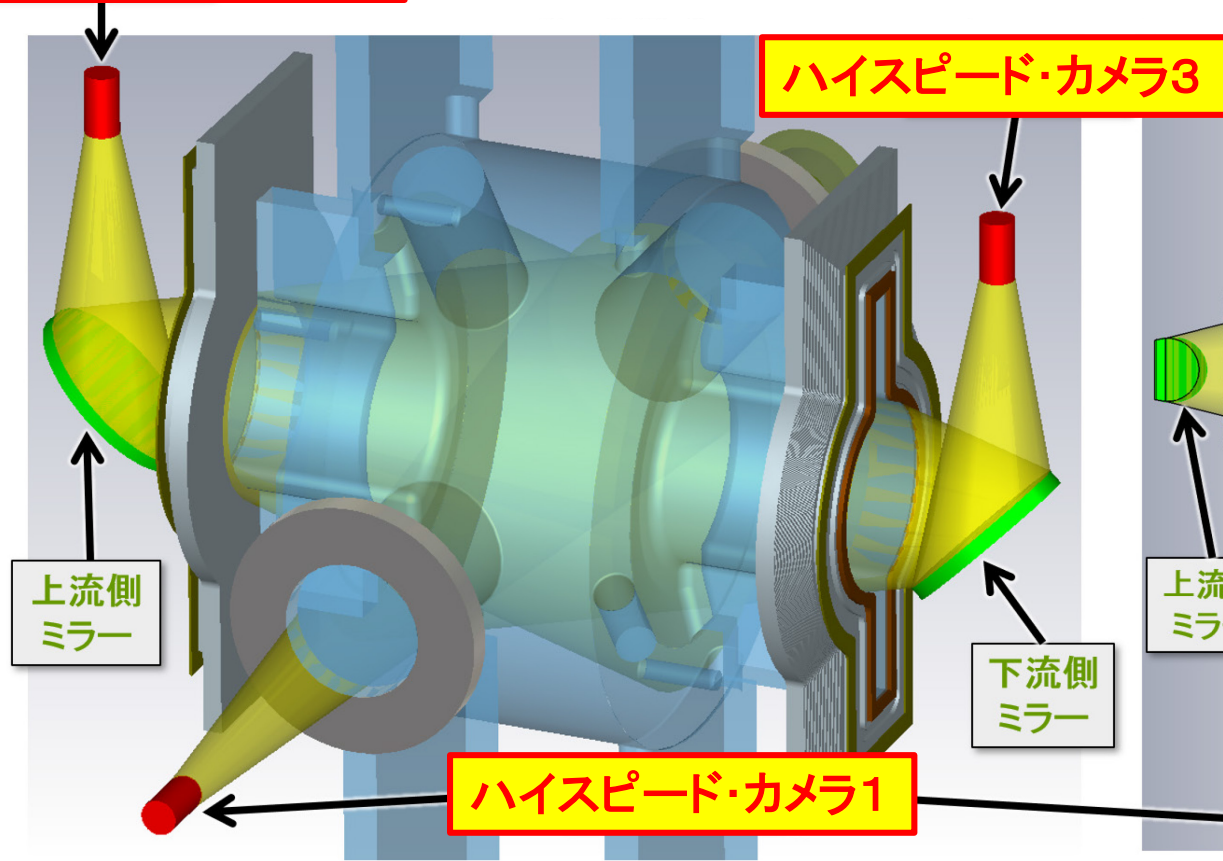


ハイスピード・カメラを使った ブレークダウンの観測

3台のハイスピード・カメラの設置



ハイスピード・カメラ2



Model: "HAS-D3M"

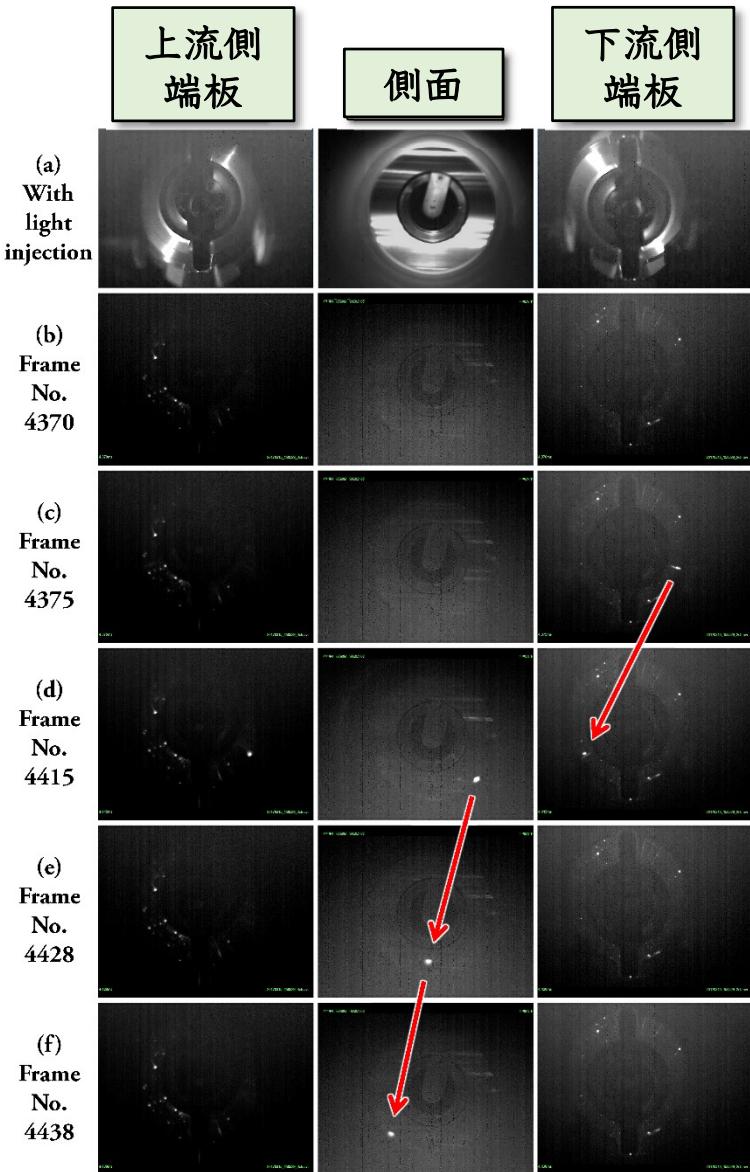
- ✓ ディテクト製 (<http://www.ditect.co.jp/index.html>)
- ✓ 最高フレーム率: 100,000 fps (本観測では 1,000 ~ 2,000 fps を使用)
- ✓ 3台のカメラ間でフレーム毎に同期可能

このセットアップで、40回のブレークダウンを検出

その40ブレークダウン事象の中の4事象で、
「飛行輝点」を観測！

事象 1/4: 下流 → 上流 → 衝突 → ブレークダウン

(フレーム率: 1,000 fps)

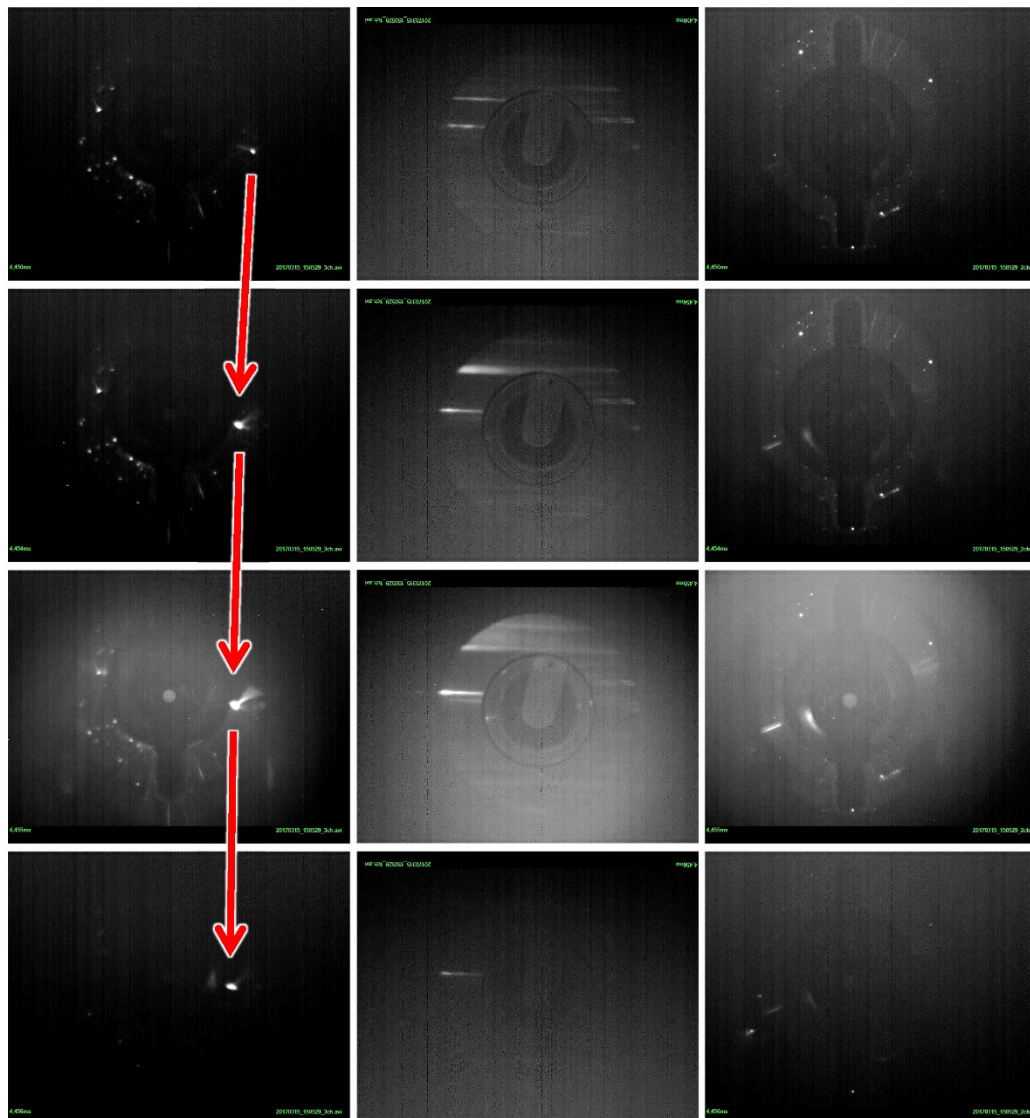


(g)
Frame
No.
4450

(h)
Frame
No.
4454

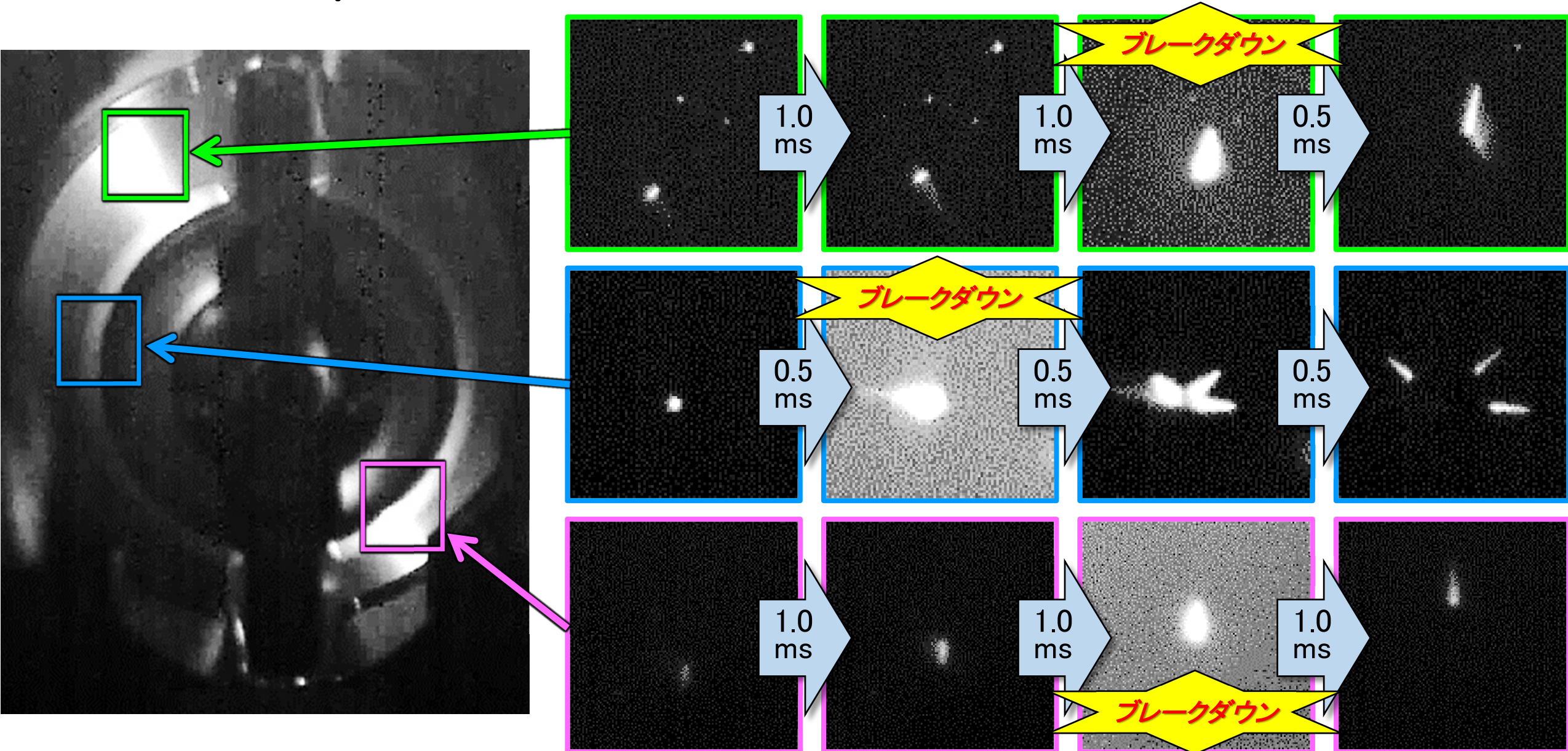
(i)
Frame
No.
4455

(j)
Frame
No.
4456



衝突(No.4455)の次の
フレーム(No.4456)で
常時発光輝点の輝度が
急落したので、
衝突の瞬間(No.4455)に
ブレークダウンが発生

事象 2~4/4: 下流側の端板に衝突 → ブレークダウン



2. 「スポット型爆発」はどのようにして発生するのか？

- 輝点の「生成→成長→爆発」が高速で起きるのか？
- ハイスピード・カメラを使って「飛行輝点→着弾→ブレークダウン」事象を複数観測した。
 - これが、「スポット型爆発」事象の正体かも知れない。
 - フレーム率の低いTVカメラでは、飛行輝点の衝突は1～2フレームにしか写らず、「スポット型爆発」として観測される。

これまでの研究成果のまとめ

- ある程度RFコンディショニングの進んだ常伝導UHF帯加速空洞のブレークダウンは、以下の2つのいずれかにより引き起こされる:
 - ① 常時発光輝点のひとつが爆発
 - ② 常時発光輝点の見られない箇所が発生するスポット型爆発

今回の研究成果のまとめ

- 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となりうる)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 ($@V_c = 0.95 \text{ MV}$ ($E_{acc} = 3.7 \text{ MV/m}$))
 - 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)と判明
- ハイスピード・カメラを使ってブレークダウンの瞬間の加速空洞内部を直接観察したところ、飛行する輝点が空洞端板の表面に衝突してブレークダウンを引き起こした事象を初めて観測した。
 - 40ブレークダウン事象の中の4事象で観測
 - これが、「スポット型爆発」の正体かも知れない。

ご清聴、ありがとうございました

- 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