

# cERL照射ビームラインのコミッショニング

Commissioning of irradiation beam line in cERL

東直

高エネルギー加速器研究機構

# 著者

島田 美帆, 帯名 崇,  
宮島 司, 本田 洋介, 山本 将博,  
中村 典雄, 下ヶ橋 秀典, 森川 祐, 松村 宏,  
豊田 晃弘, 吉田 剛, 保住 弥紹, 原田 健太郎  
高エネルギー加速器研究機構

# KEK, cERLにおける照射実験計画の開始

エネルギー回収Linac (ERL)の原理実証機であるcERL



照射ビームライン



# KEK, cERLにおける照射実験計画の開始

2018年10月から照射ビームラインの建設が開始され、3月に完成。



# KEK, cERLにおける照射実験計画の開始

最大エネルギー

21 MeV (RI生成)

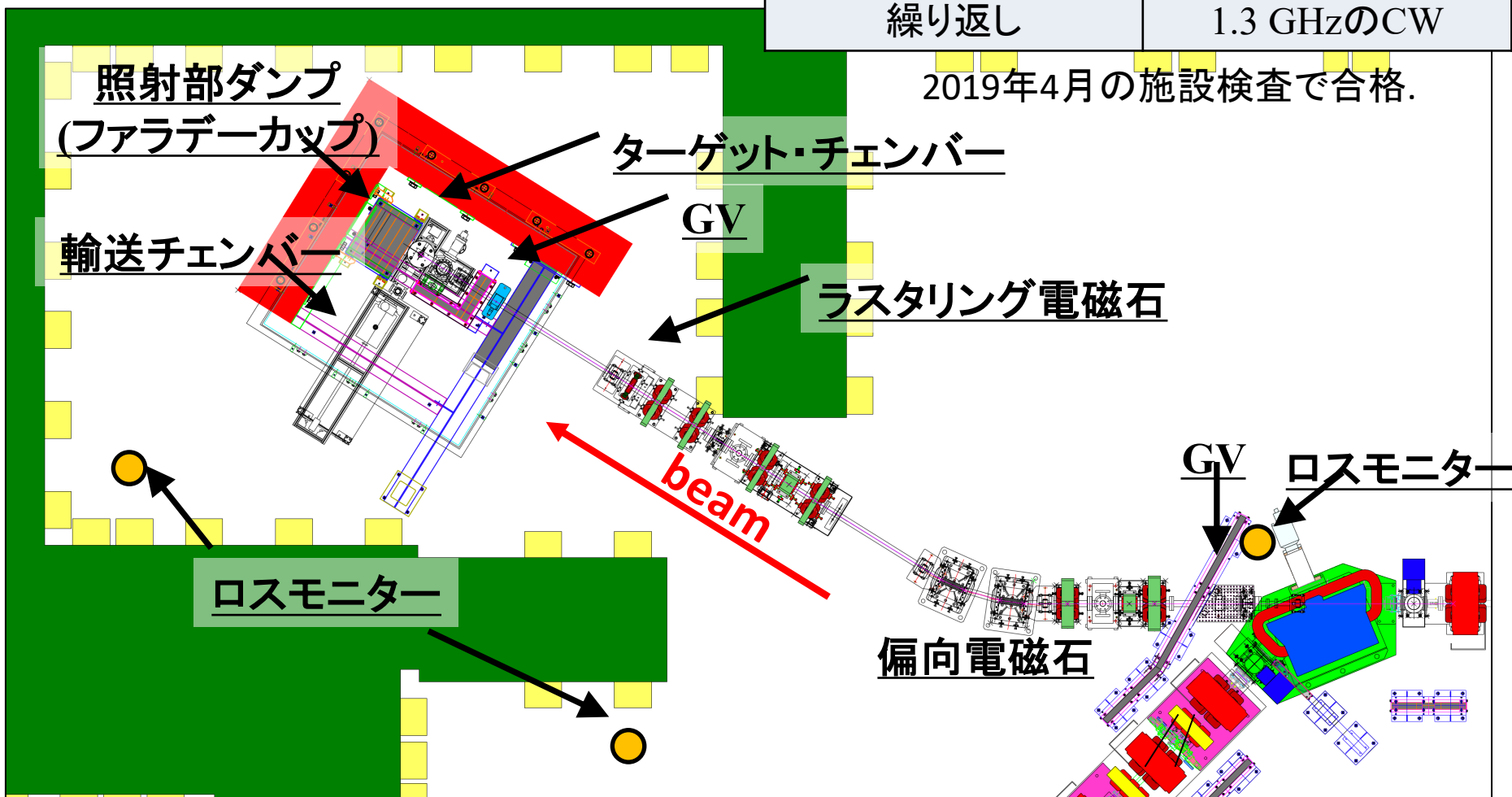
最大電流

10  $\mu$ A

繰り返し

1.3 GHzのCW

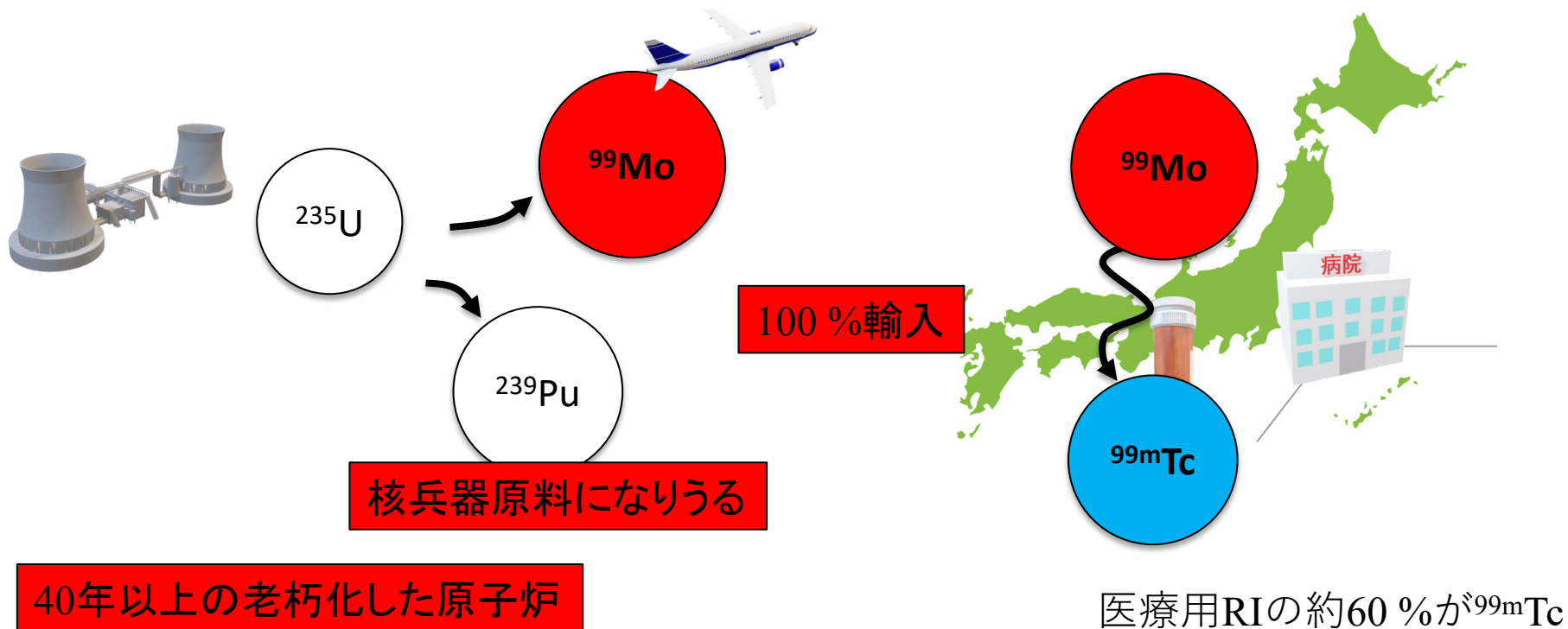
2019年4月の施設検査で合格.



# 照射実験計画のモチベーション

1.  $^{99}\text{Mo}$ の製造
2. 電子線照射による  
アスファルトの高寿命化

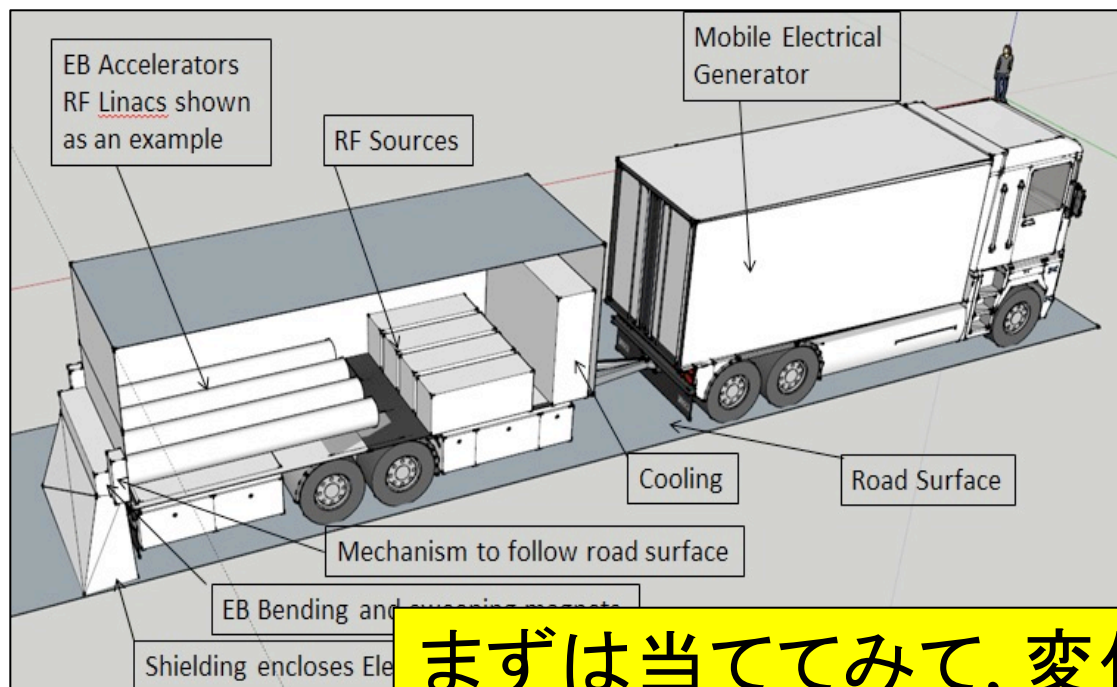
# 1. $^{99}\text{Mo}$ の製造



日本国内での安定した $^{99}\text{Mo}$ の供給を目指す.

## 2. 電子線照射によるアスファルトの高寿命化

- ・アメリカでは、370万マイル～596万kmの舗装道路を維持していて、その補修に毎年500億ドル～54兆円もかかっている。
- ・ある試算<sup>[1-2]</sup>によれば、10 MeVの電子ビームで表面から2, 3 cmのアスファルトに照射でき、200 kGy (= J/g)程度の照射でアスファルトの強化 (架橋)が可能になる。



[1] U.S. DOE, Office of Science, Workshop on Energy and Environmental Applications of Accelerators, June 24–26, 2015

[2] T.K.Kroc and R.D.Kephart, "Industrial Accelerators -Beyond Transformers and Cyclotrons, More Power", FERMILAB-CONF-15-131-AD, 2015



# 照射ビームラインの要求仕様

1. beam sizeの可変性
2. lossの低減
3. 照射エネルギーの可変性
4. 周回部運転との共存

# 照射ビームラインのスケジュール

2018年度						2019年度											
10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
BLの建設																	
First Commissioning: 施設検査合格																	
初めての照射実験																	
						MBq級RI生成, 他											
												cERL運転予定					

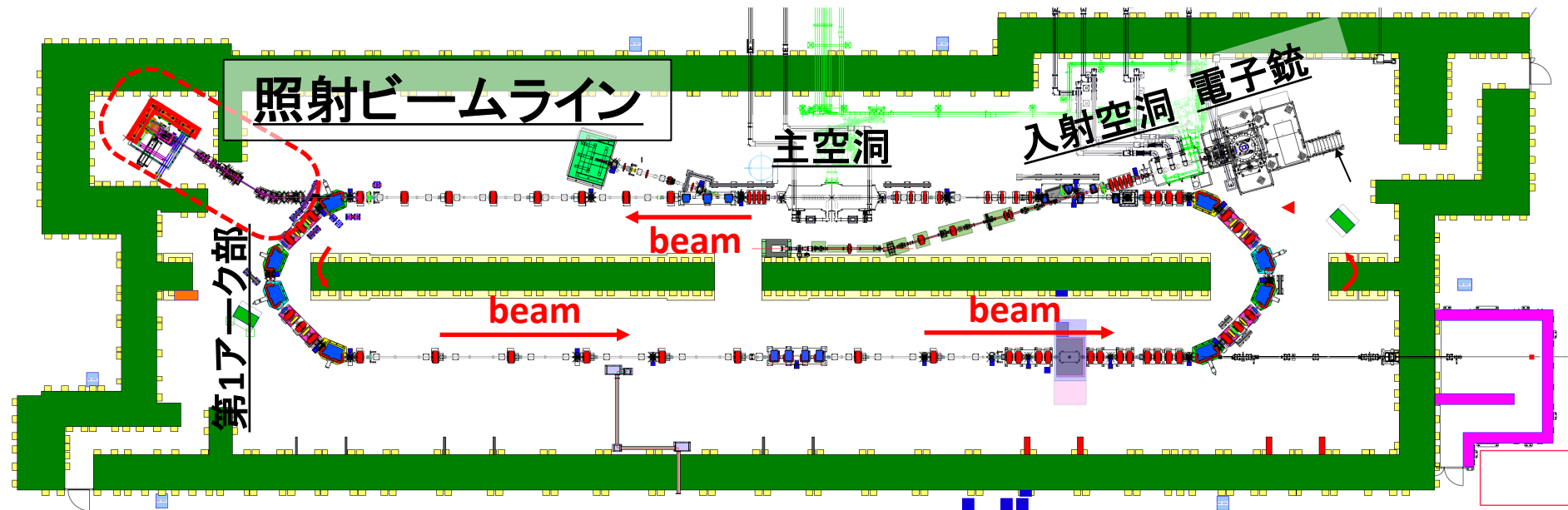
# 本日の発表内容

1. イントロダクション
2. 照射ビームラインの概要
3. 2019年4月期コミッショニング
4. 2019年6月期の照射実験
5. まとめ
6. 今後の予定

## 2. 照射ビームラインの概要

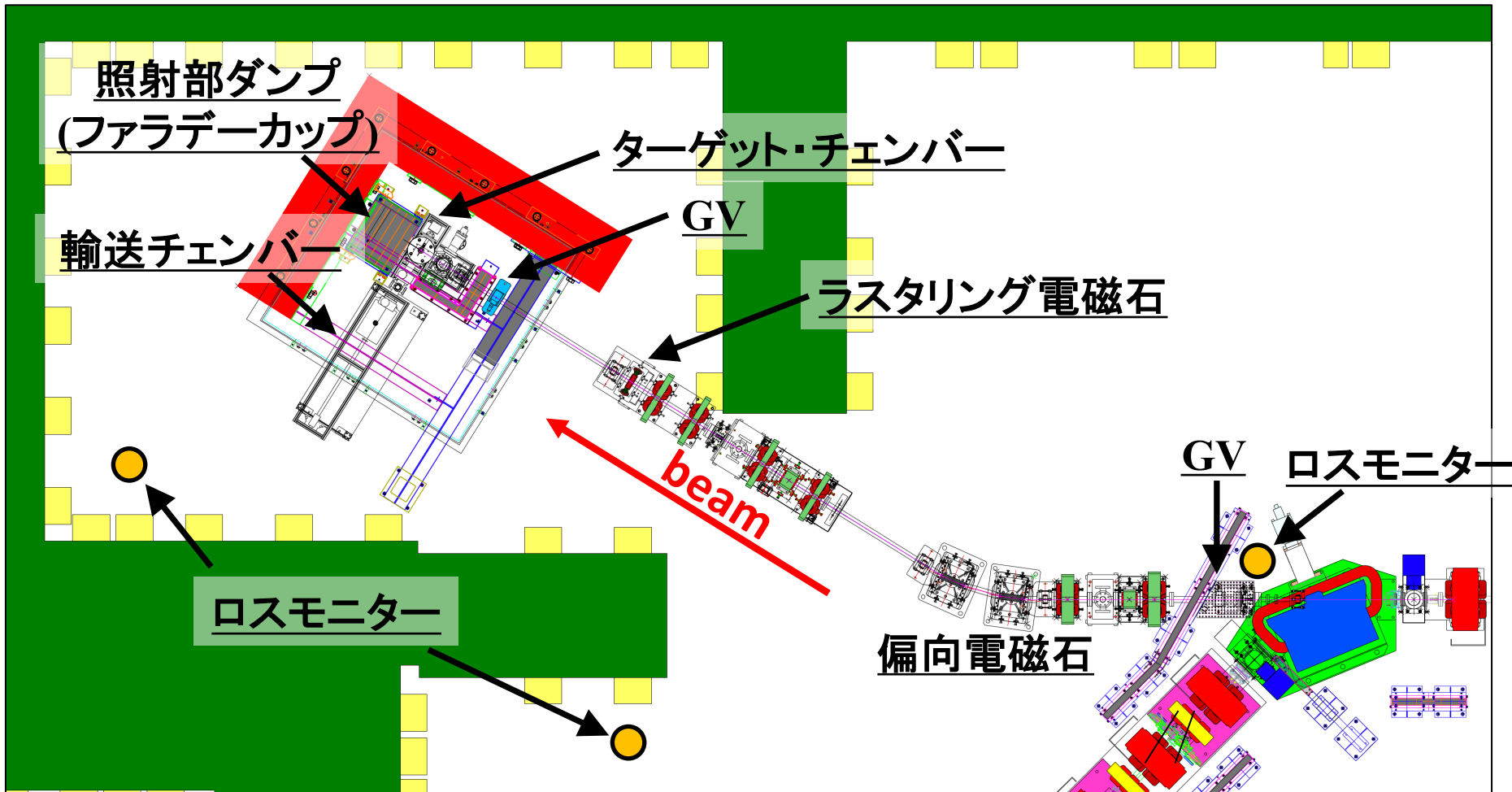
### ・これまでのcERL

- ・500 kV DC 光陰極電子銃
- ・入射空洞: 超伝導の2-cell 3空洞で最大5 MV加速設計
- ・主空洞: 超伝導9-cell 2空洞で最大30 MVの加速設計



## 2. 照射ビームラインの概要

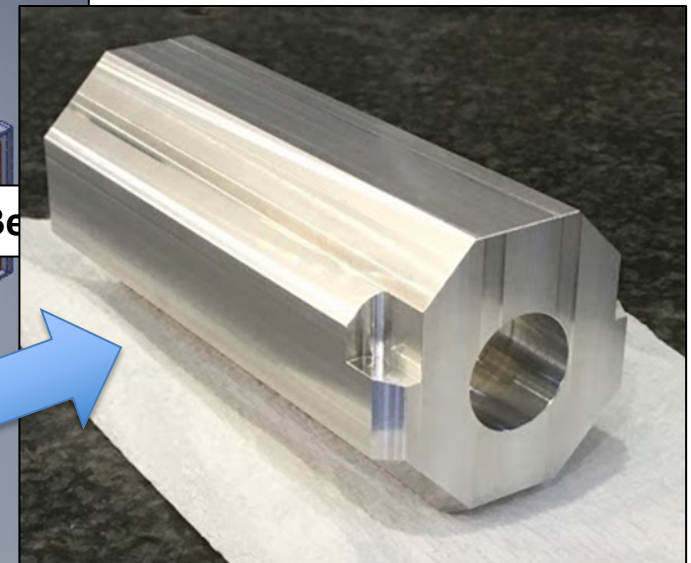
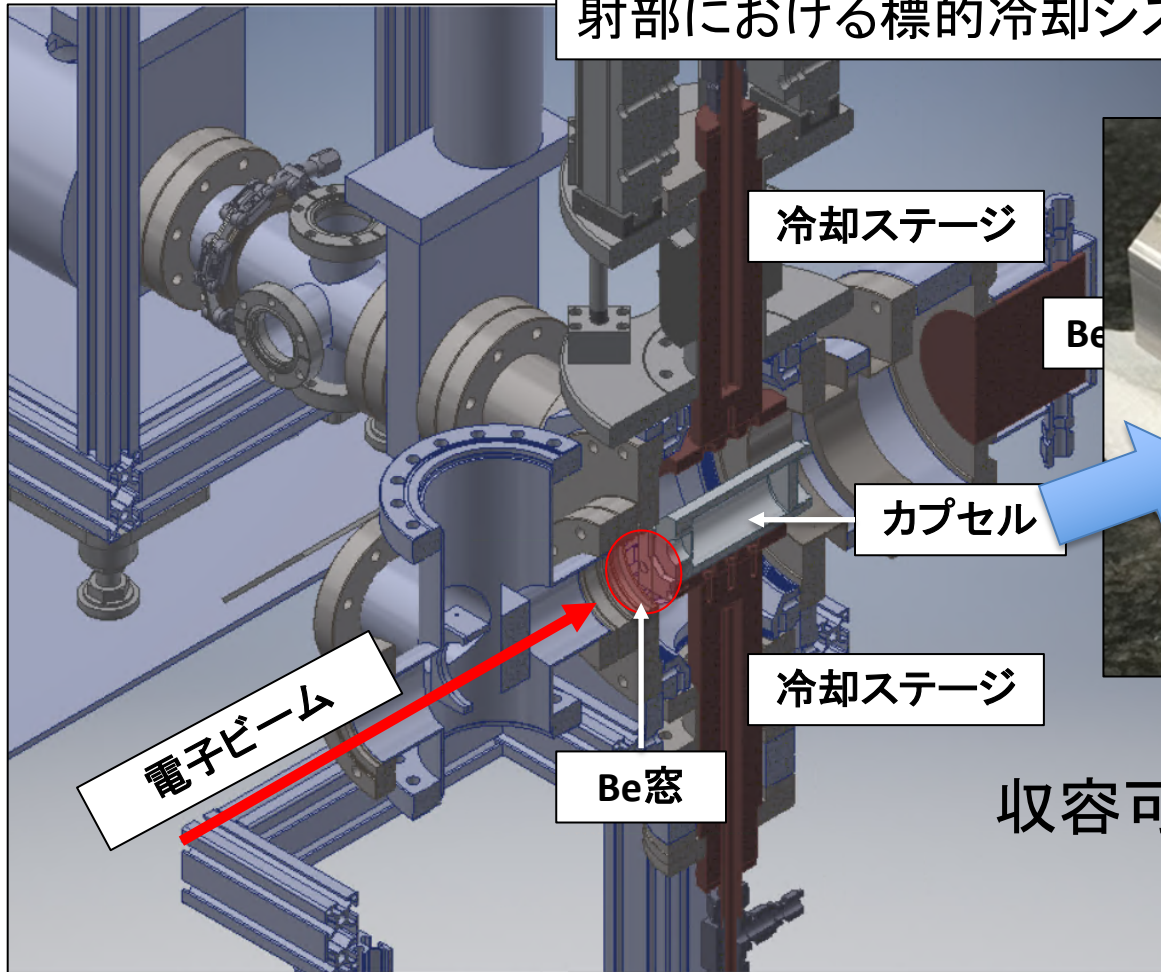
### ・照射ビームラインの追加



## 2. 照射ビームラインの概要

### ・ターゲットチェンバー

詳しくは7/31(水)のポスター, 森川 祐, “cERL電子線照射部における標的冷却システムの開発”, WEPH017



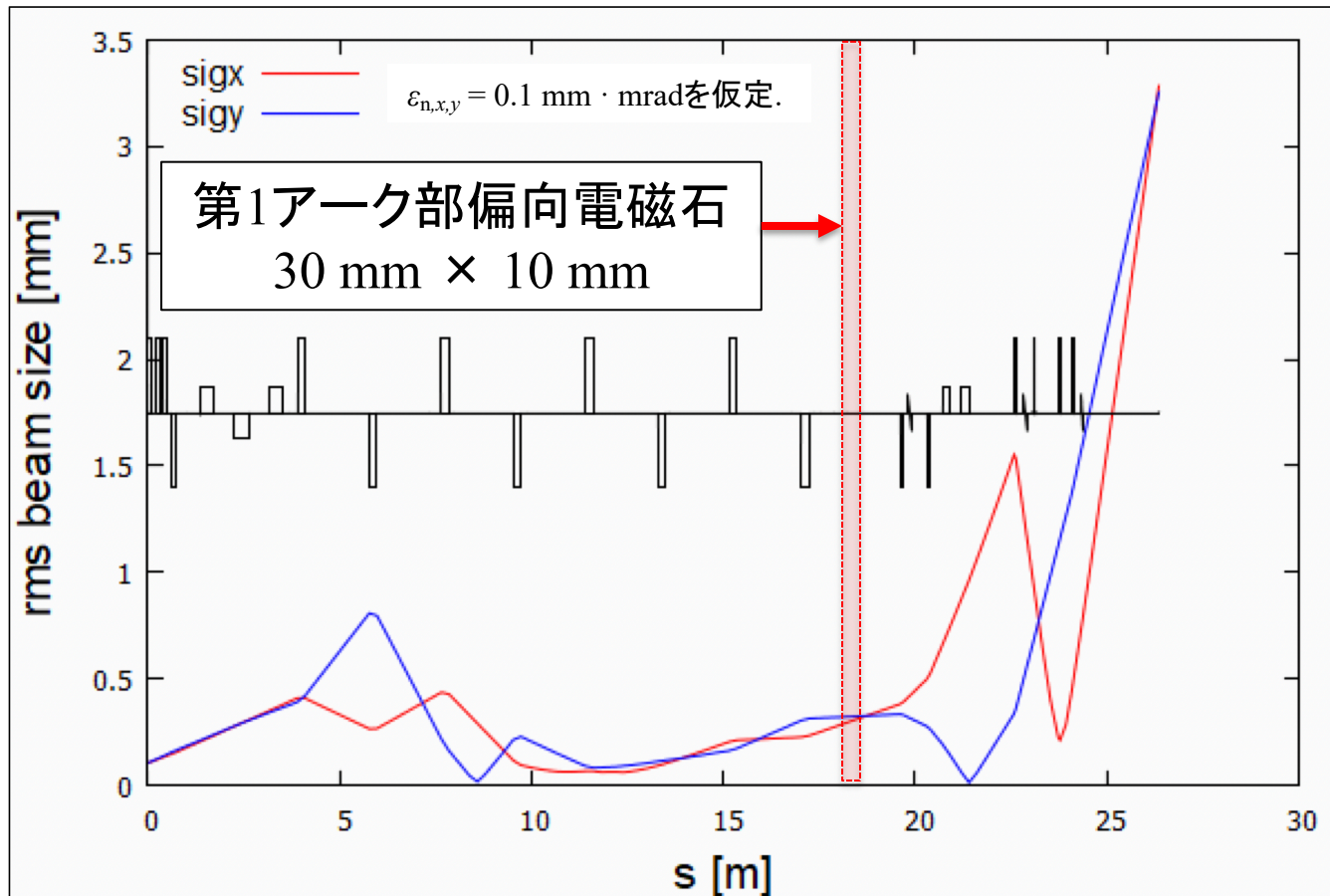
アルミ合金製.

收容可能サイズφ38×L80mm.



## 2. 照射ビームラインの概要

### ・照射ビームラインのoptics



照射ターゲットの熱的及び真空的保護の観点から、 $\sigma_{x,y} \sim 3 \text{ mm}$ を目安に設計.



# 本日の発表内容

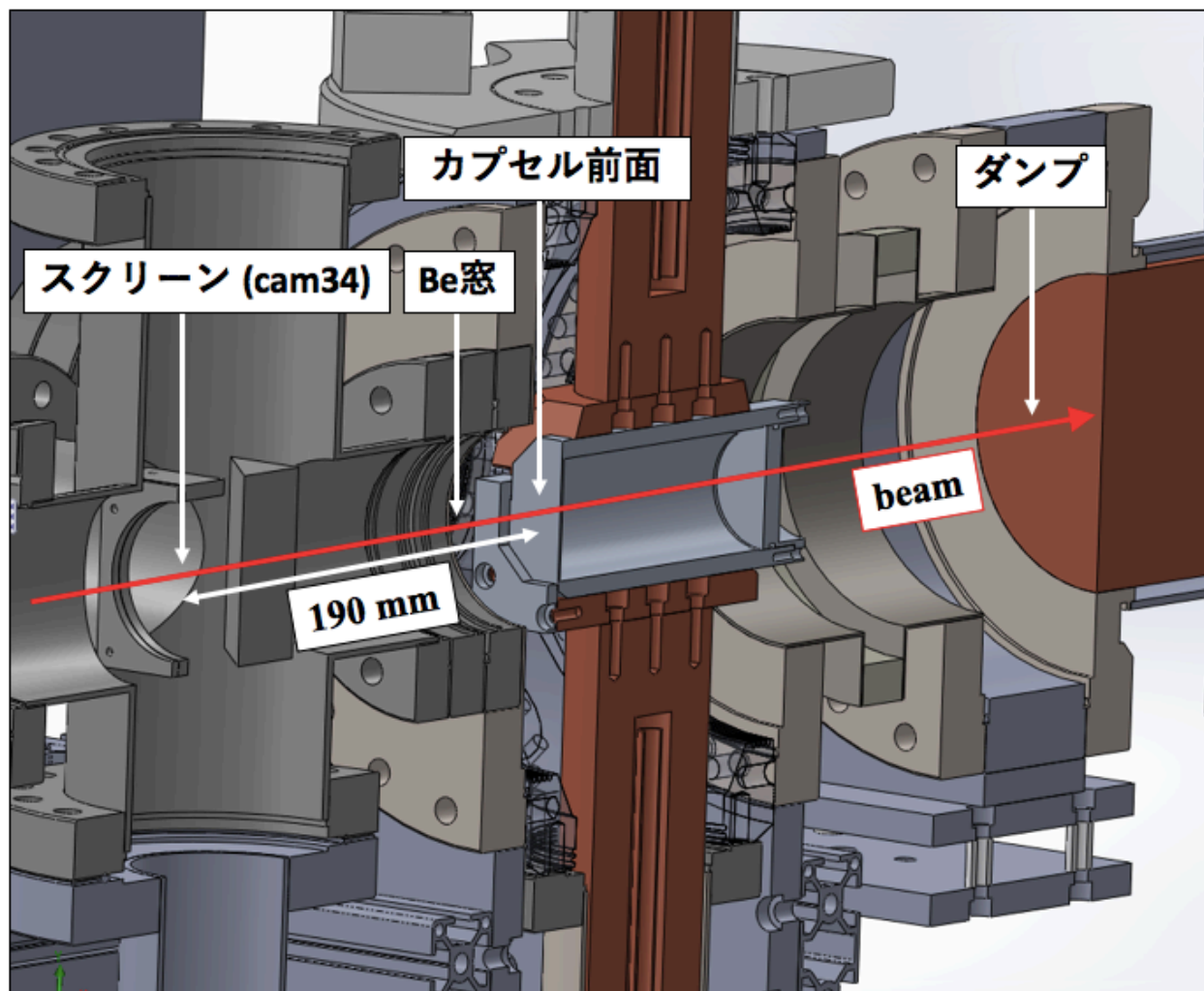
1. イントロダクション
2. 照射ビームラインの概要
3. 2019年4月期コミッショニング
4. 2019年6月期の照射実験
5. まとめ
6. 今後の予定

### 3. 2019年4月期コミッショニング

- ・ダンプまでの輸送確認
  - ・コリメータの調整
  - ・CW照射後の残留放射線量測定
  - ・施設検査の実施, 合格
  - ・空カプセルへの照射試験
- 100 ns × 5 Hzのburst mode

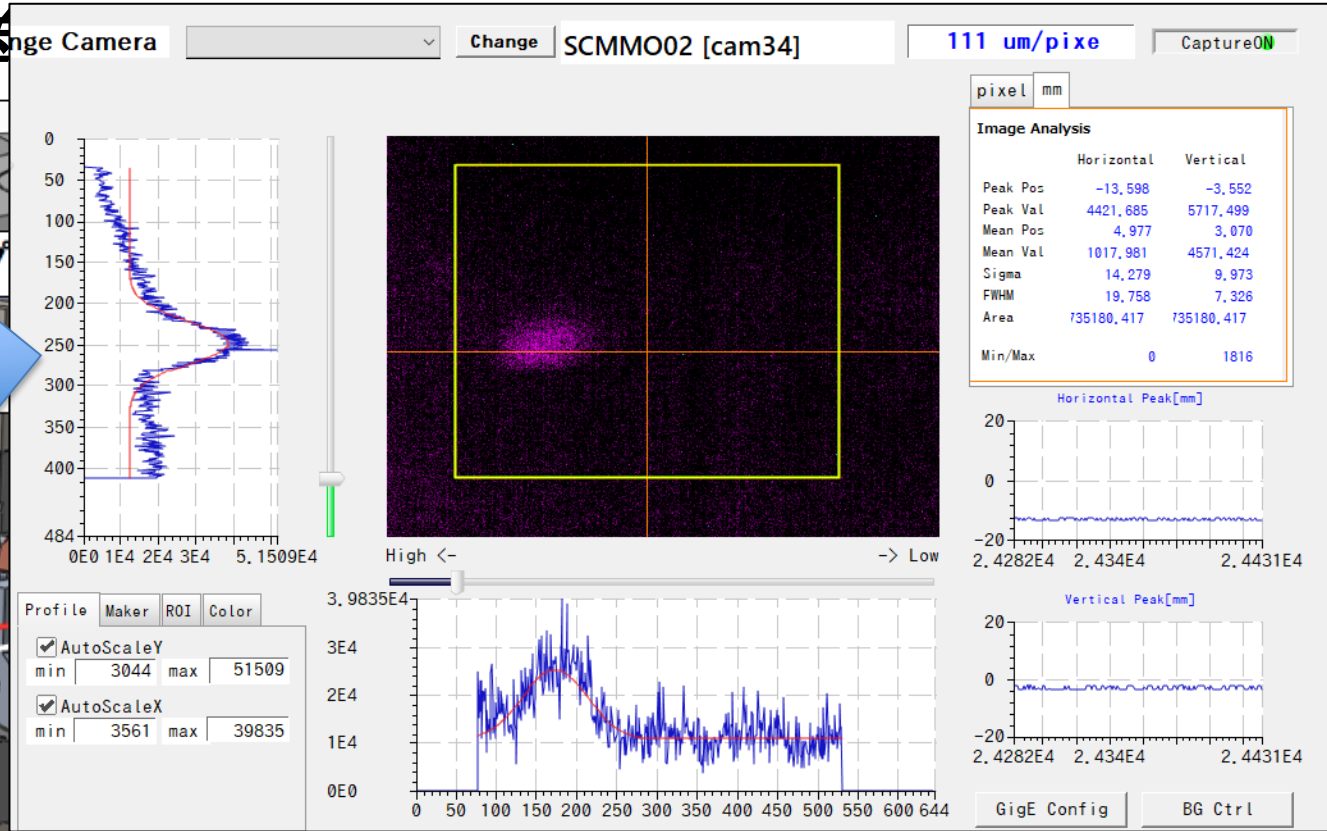
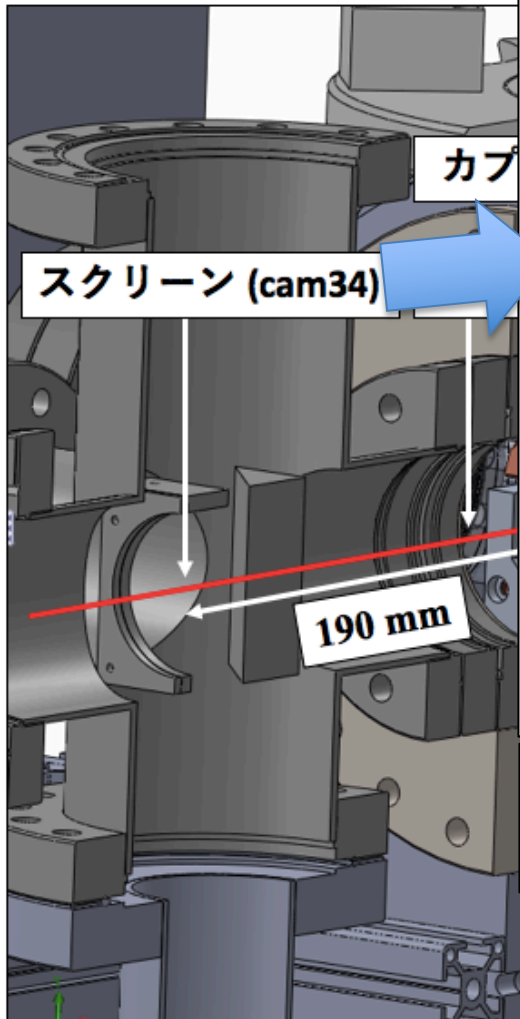
### 3. 2019年4月期コミッショニング

#### ・ダンプまでの輸送確認



# 3. 2019年4月期コミッションング

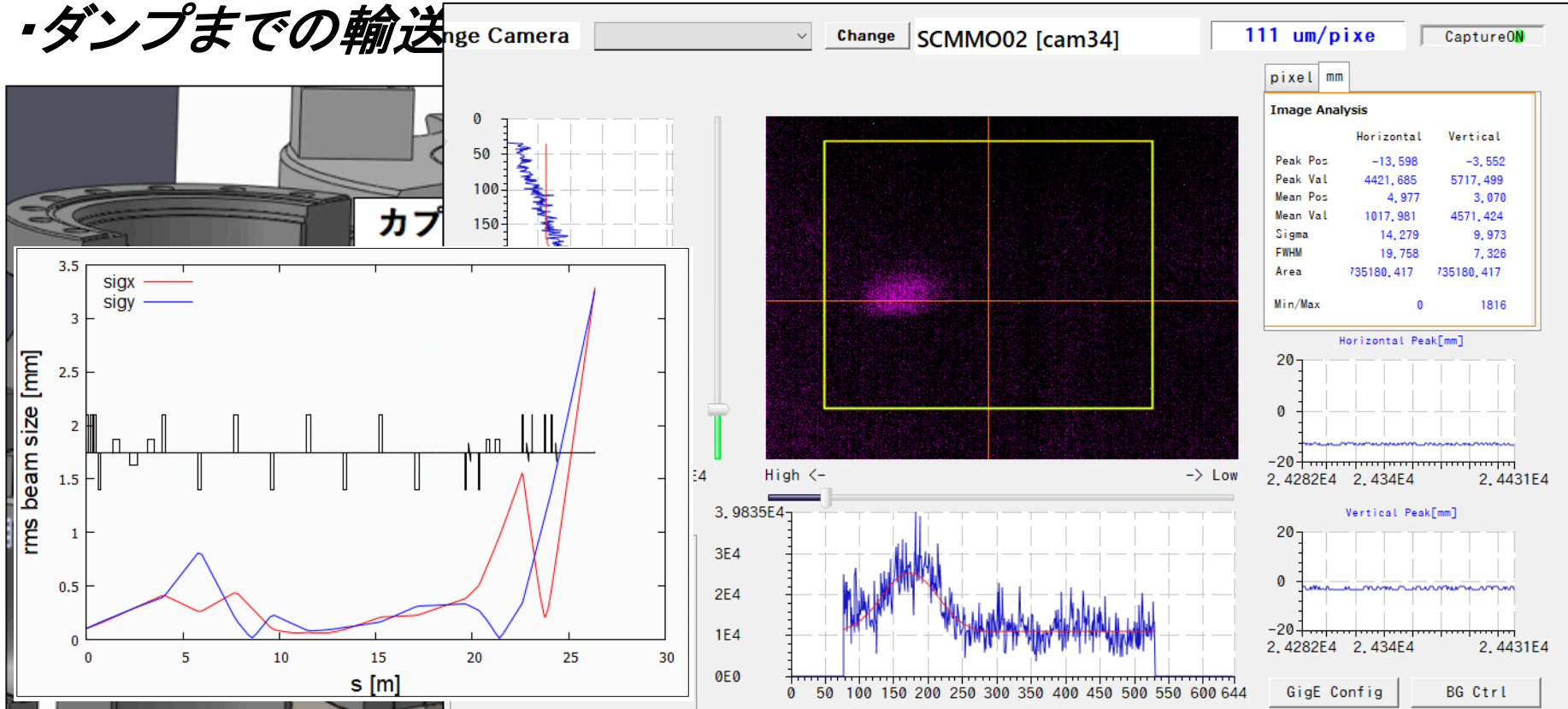
・ダンプまでの輸送



ターゲット直前のスクリーン (cam34)でのbeam profile.  $\sigma_x \sim 4$  mm,  $\sigma_y \sim 3$  mm.

# 3. 2019年4月期コミッションング

・ダンプまでの輸送

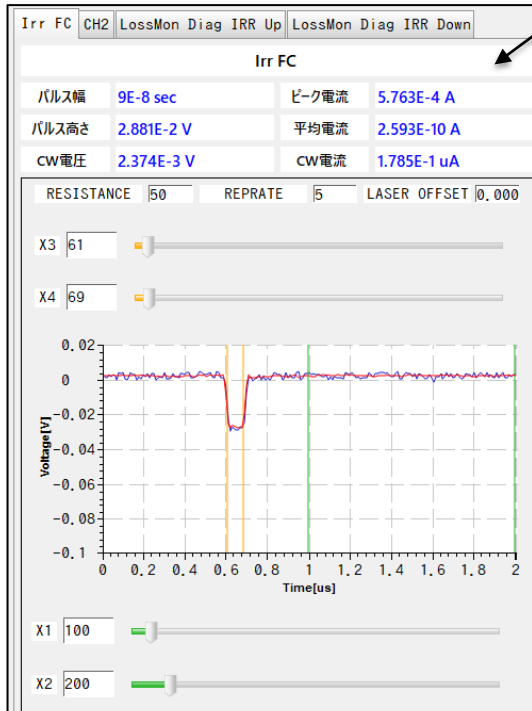
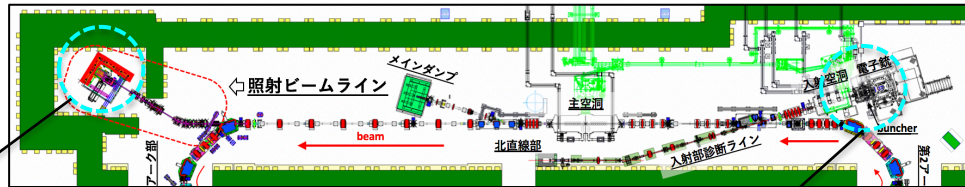


ターゲット直前のスクリーン (cam34) でのbeam profile.  $\sigma_x \sim 4$  mm,  $\sigma_y \sim 3$  mm.

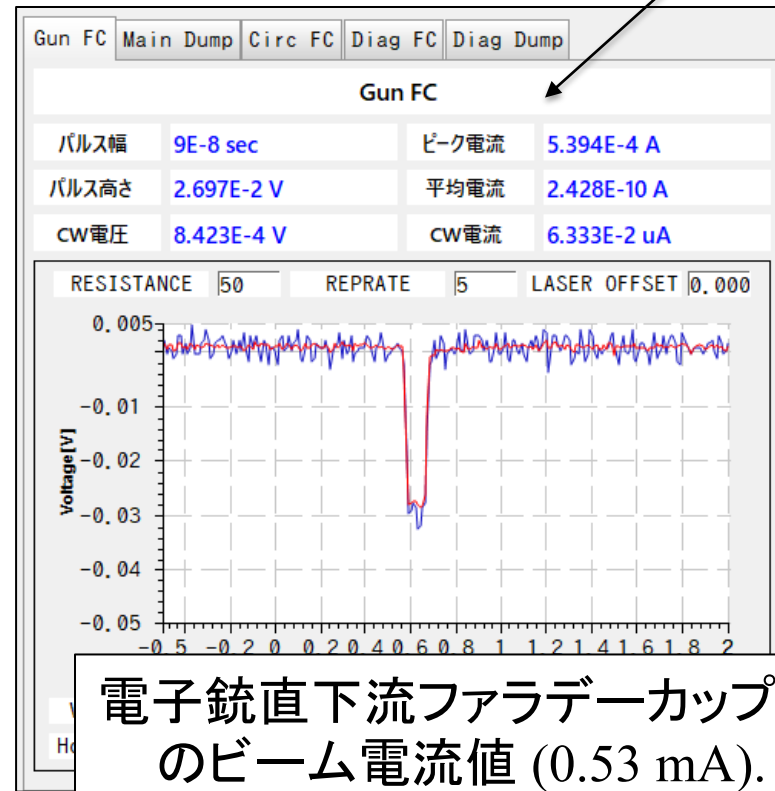
おおよそ設計通りのbeam-sizeになっていることを確認.

# 3. 2019年4月期コミッションング

## ・ダンプまでの輸送確認



照射BL ダンプでの  
ビーム電流値 (0.57 mA).



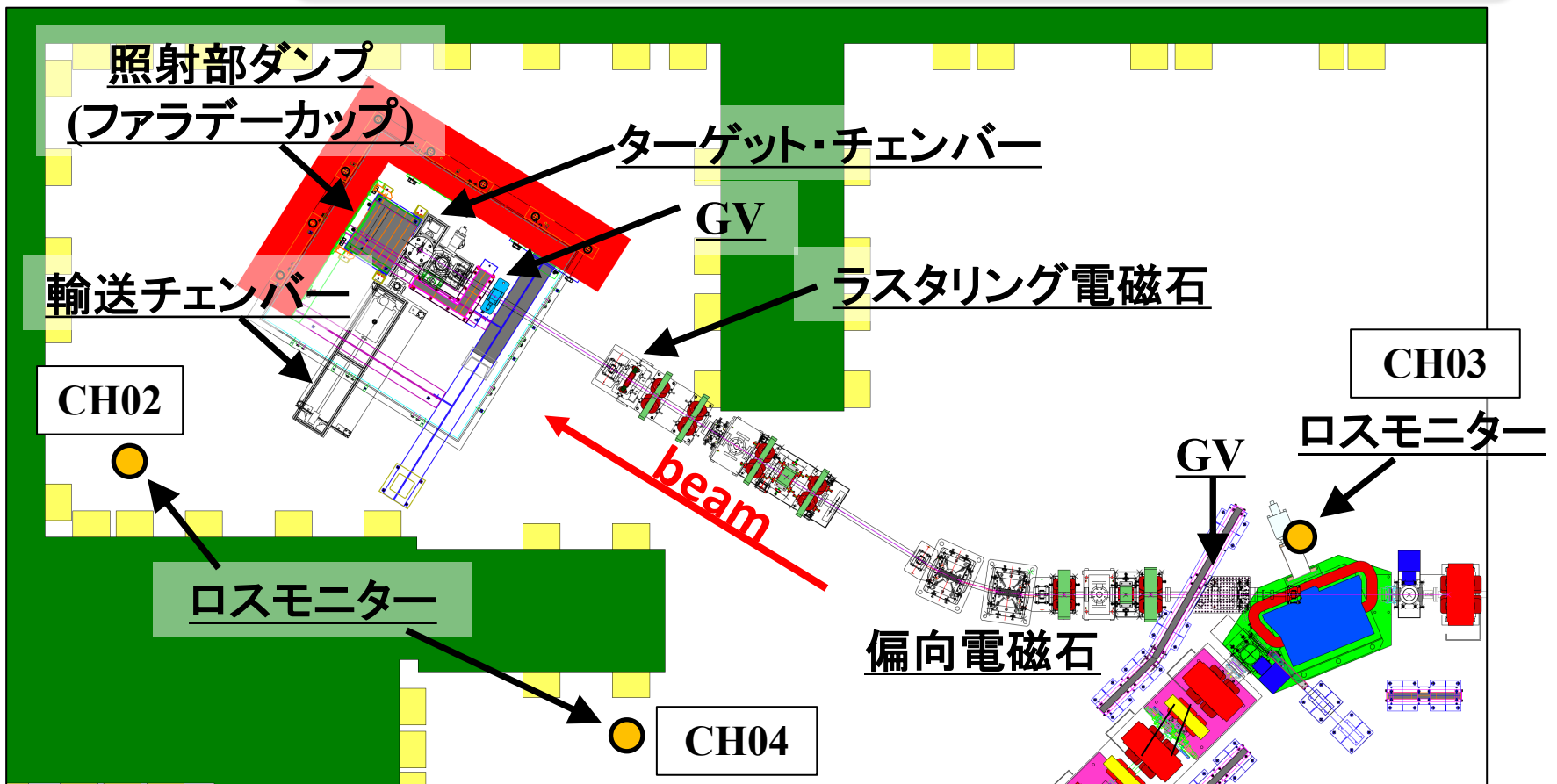
電子銃直下流ファラデーカップで  
のビーム電流値 (0.53 mA).

輸送効率100%を確認.

### 3. 2019年4月期コミッションング

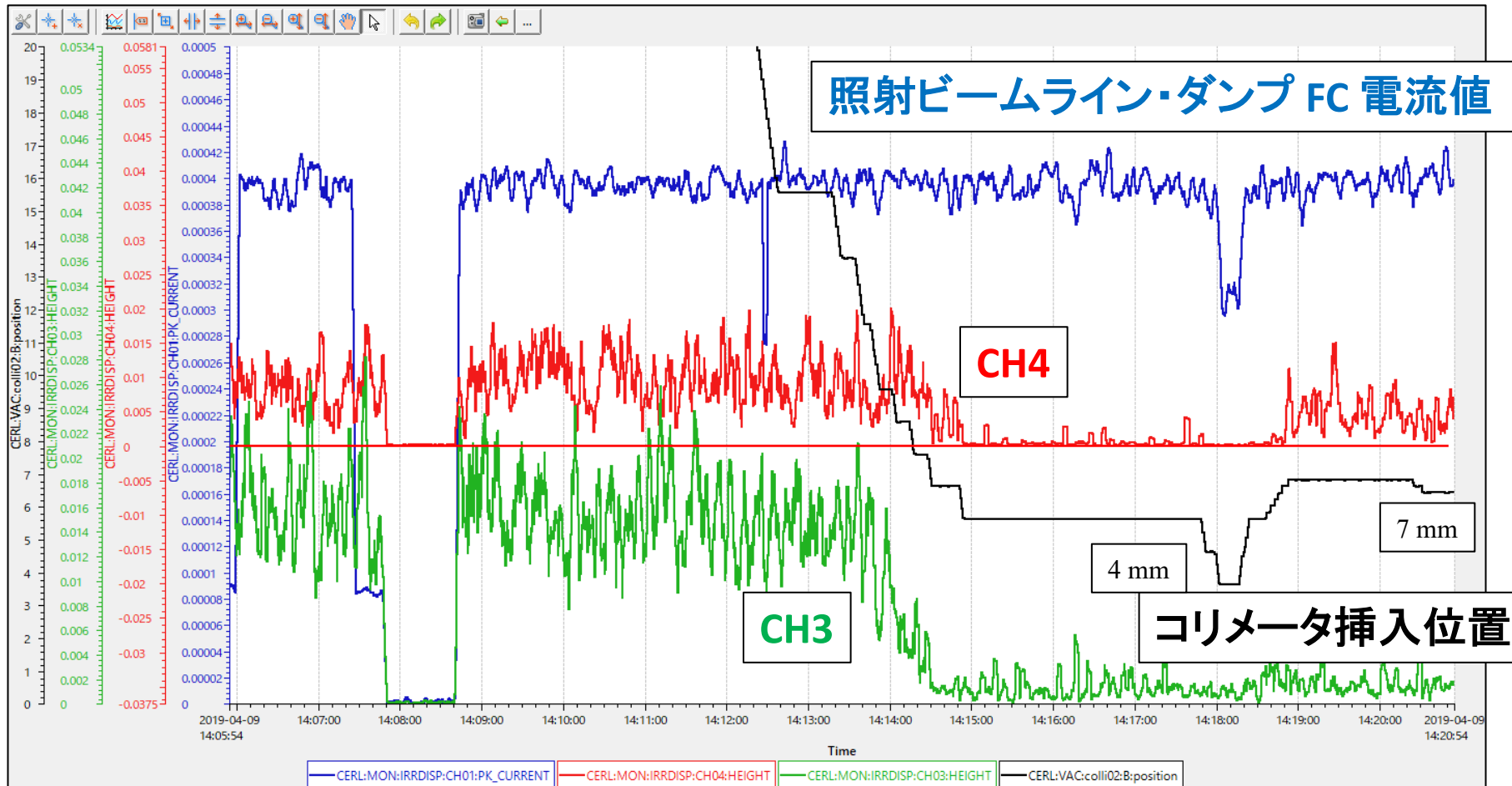
#### ・コリメータの調整

- 目的
1. 照射された試料を取り出すため、残留放射線量を抑制する。
  2. 運転中の加速器室内外の放射線量を抑制する。



# 3. 2019年4月期コミッションング

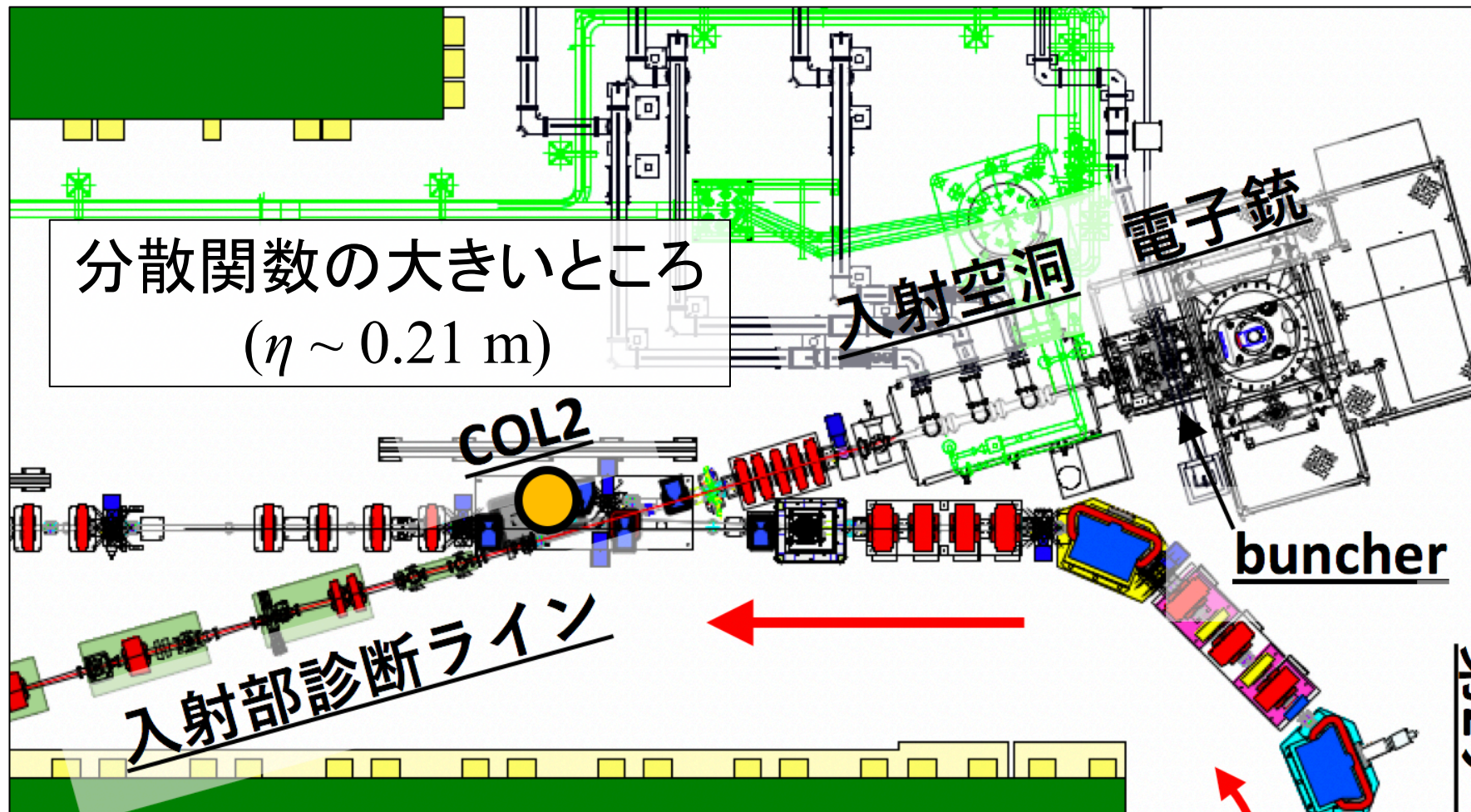
## ・コリメータの調整





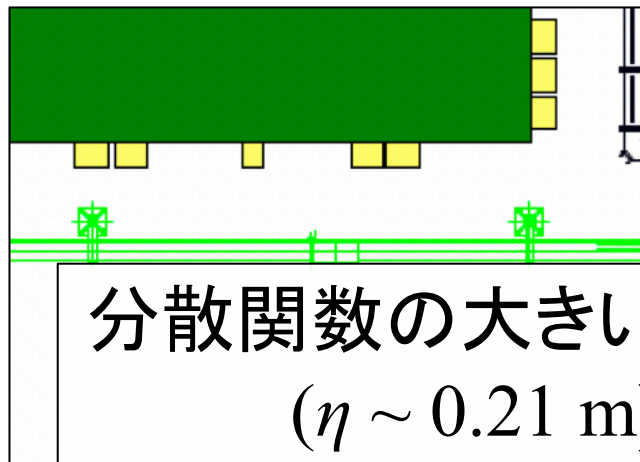
### 3. 2019年4月期コミッションング

#### ・コリメータの調整



# 3. 2019年4月期コミッションング

## ・コリメータの調整



Collimator Control 2019/04/09 14:21:24

無酸素銅製

ChC Top  
Current Position: 24.55 mm  
Set Step: 10.00 mm  
Temperature: Disconnected

ChA Left  
Current Position: 24.94 mm  
Set Step: 10.00 mm  
Temperature: Disconnected

ChB Right  
Current Position: 6.42 mm  
Set Step: 0.20 mm  
Temperature: Disconnected

ChD Bottom

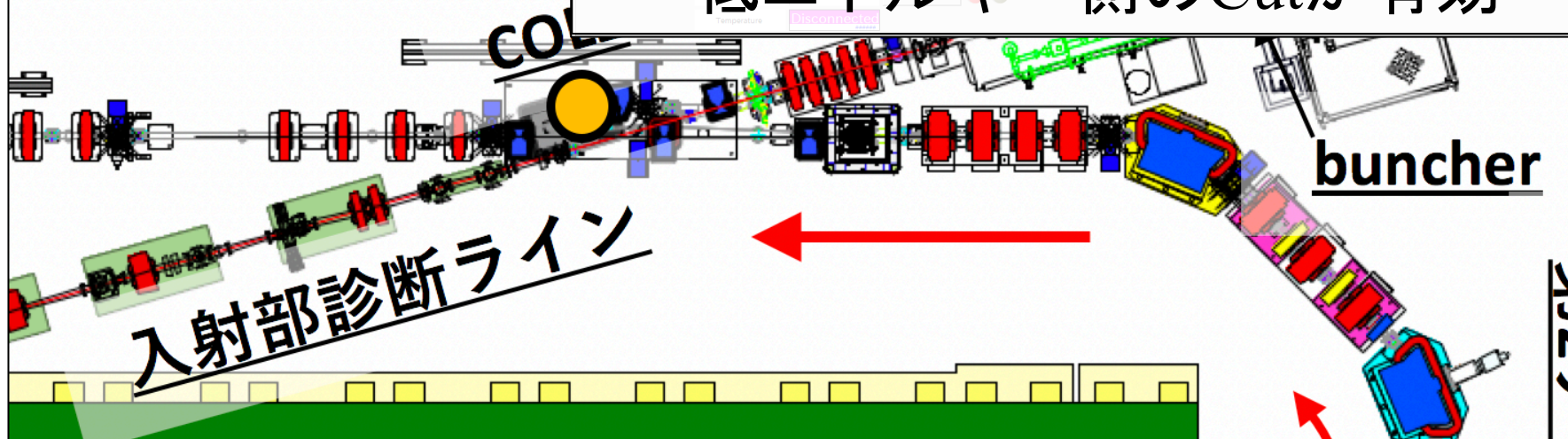
COL2

7 mm

STOP Slowly

STOP Emergency

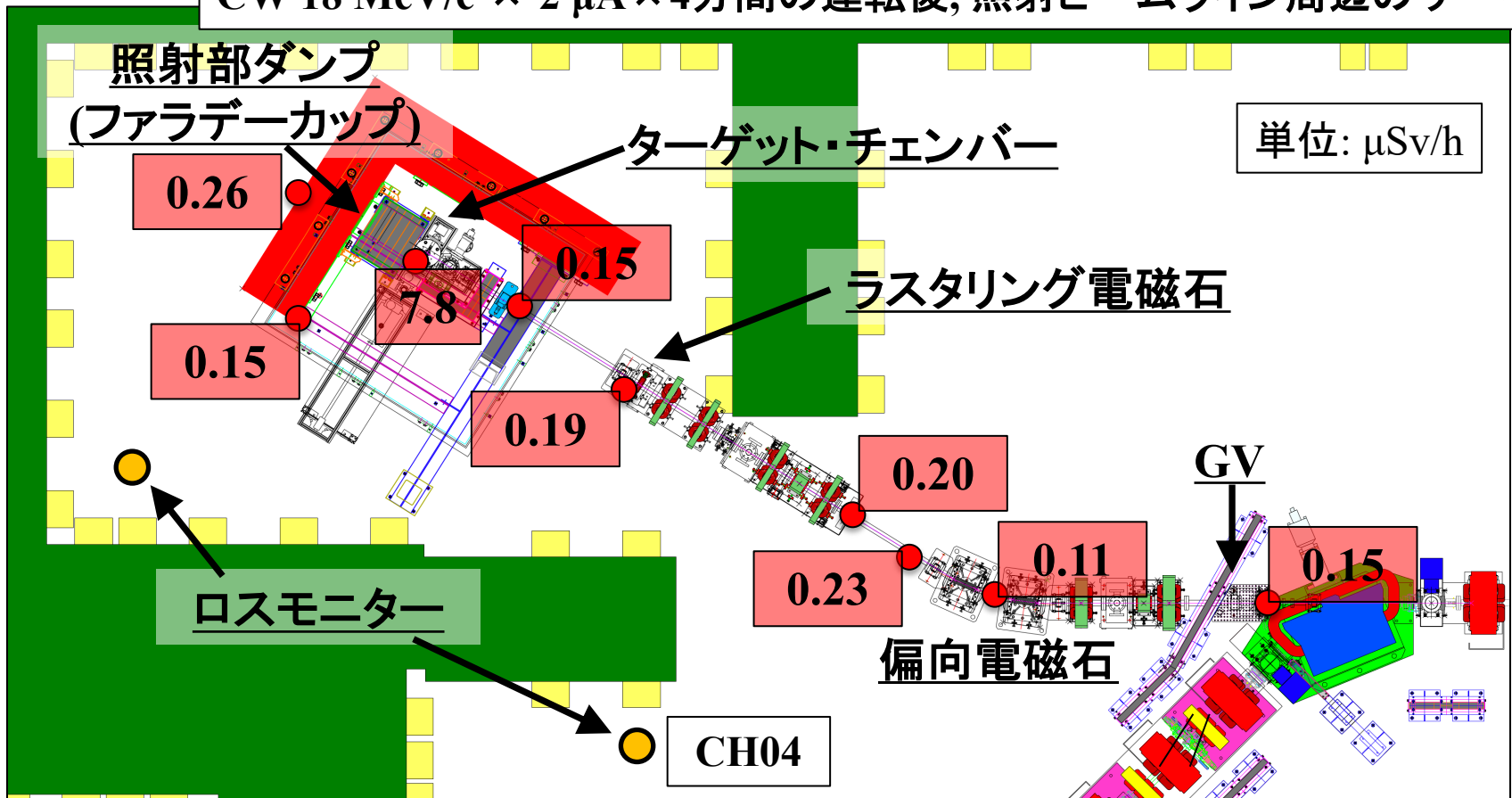
低エネルギー側のCutが有効



### 3. 2019年4月期コミッションング

#### ・CW照射後の残留線量測定

CW 18 MeV/c × 2 μA × 4分間の運転後、照射ビームライン周辺のサーベイ



問題になるレベルではない。



### 3. 2019年4月期コミッショニング

#### ・施設検査の実施, 合格

4月12日に施設検査実施, 17日付けで合格. この結果, cERLは新たな使用目的として“電子ビームを使用した放射性同位元素の製造と理化学的研究”が追加された.

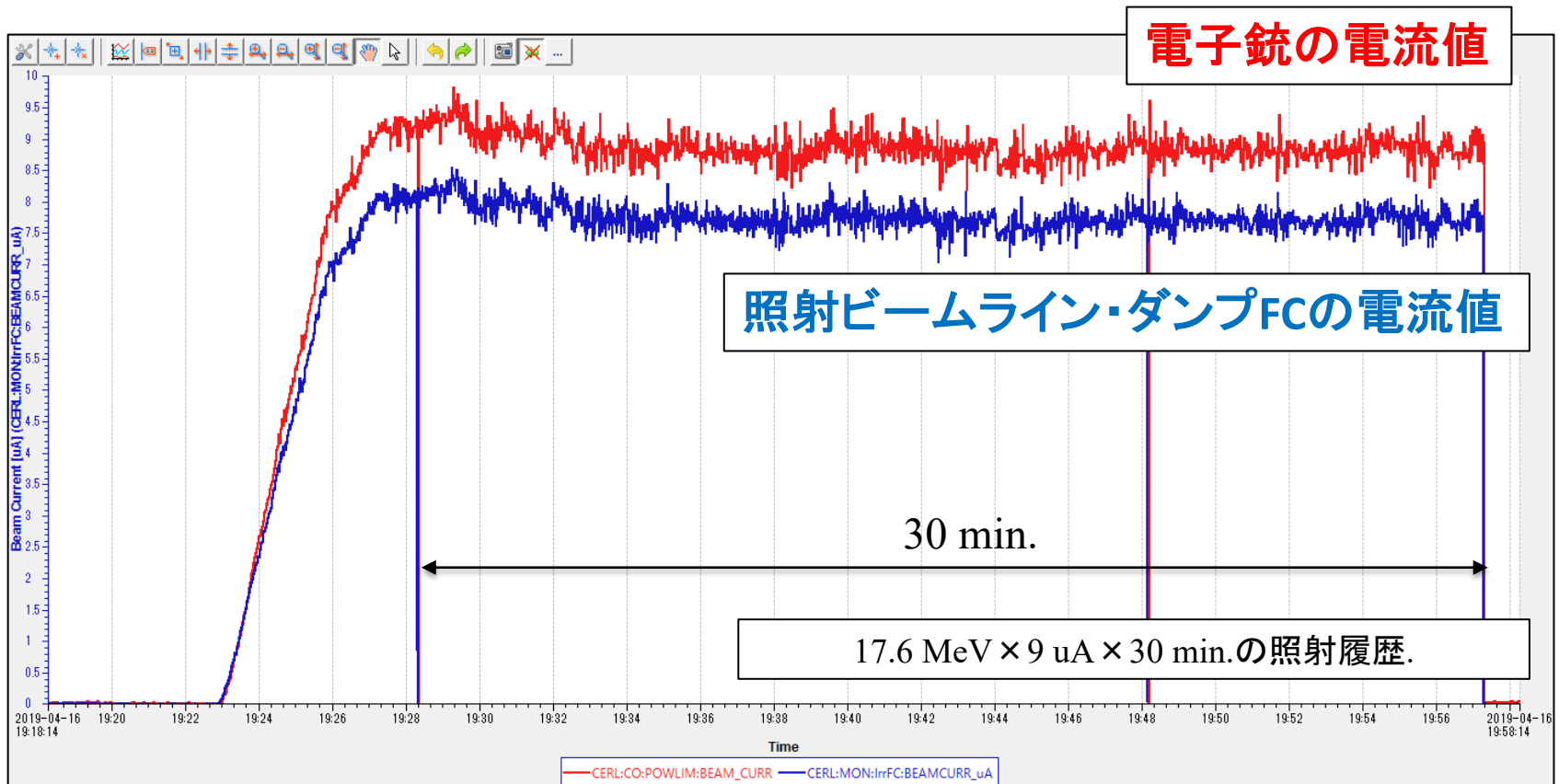
	エネルギー回収 リニアック開発研究 及び応用研究	<sup>99</sup> Mo 電子ビームを使用した 放射性同位元素の製造	アスファルト 理化学的研究
最大エネルギー	26 MeV	21 MeV	10 MeV
最大電流	1 mA	10 $\mu$ A	10 $\mu$ A

今回追加されたcERLの使用目的.

### 3. 2019年4月期コミッションング

#### ・空カプセルへの照射試験

$p \sim 10 \text{ MeV}/c$ ,  $18 \text{ MeV}/c$ の2つの運動量で, 最大 $9 \mu\text{A}$ , 最長30分の照射を合計10回実施し, ターゲット・システムの健全性を確認.



# 本日の発表内容

1. イントロダクション
2. 照射ビームラインの概要
3. 2019年4月期コミッショニング
4. 2019年6月期の照射実験
5. まとめ
6. 今後の予定

## 4. 2019年6月期の照射実験

6月期はカプセルにMo試料やアスファルトを封入し、照射実験を行った。

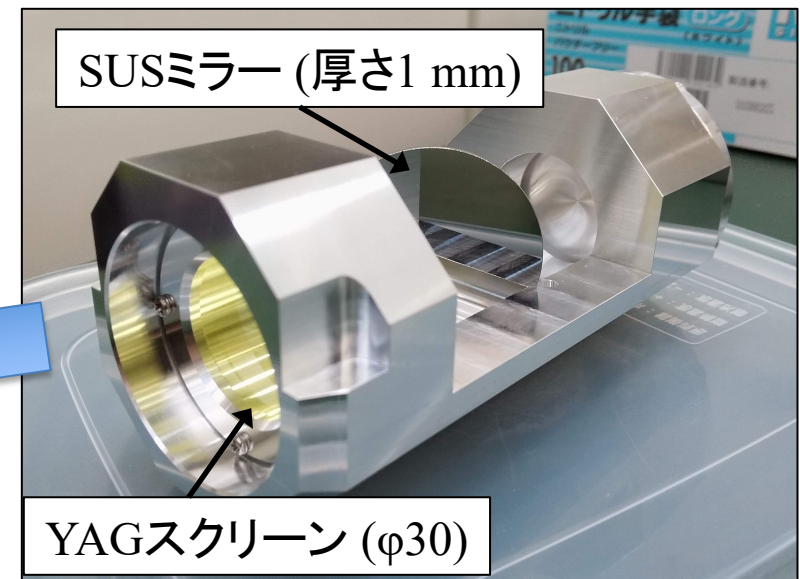
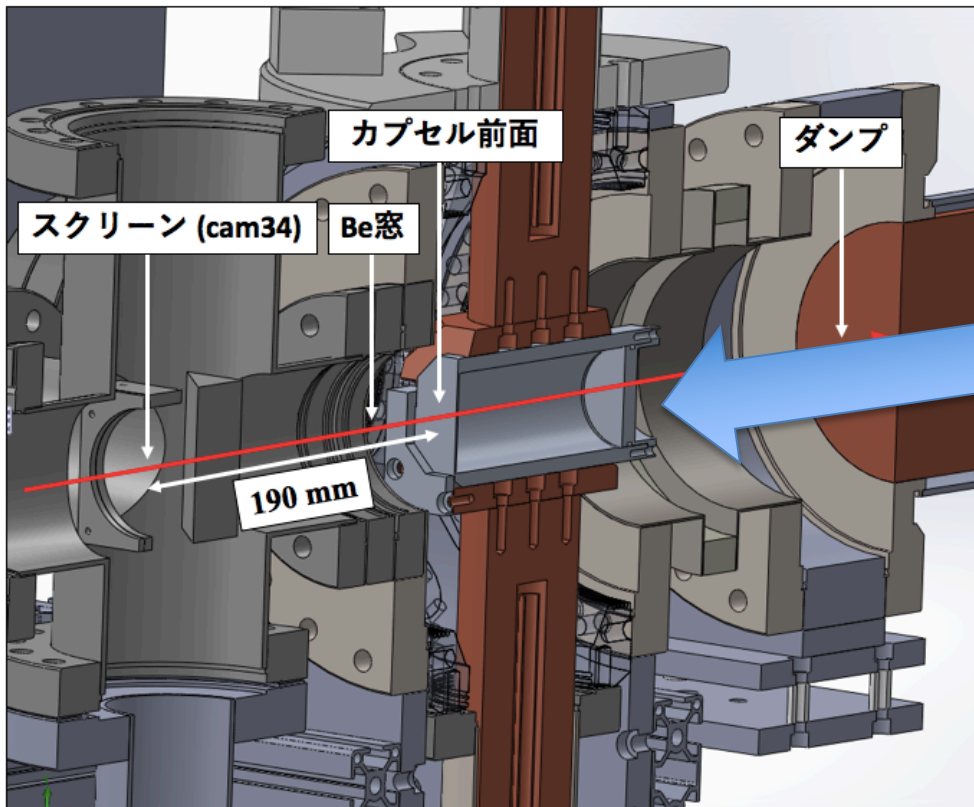
- スクリーン付きカプセルを使用したbeamの調整
- エネルギーの掃引
- エネルギー (運動量)の安定度と測定誤差
- Moによるbeam profileの評価
- Mo照射実験の結果 (一例)



## 4. 2019年6月期の照射実験

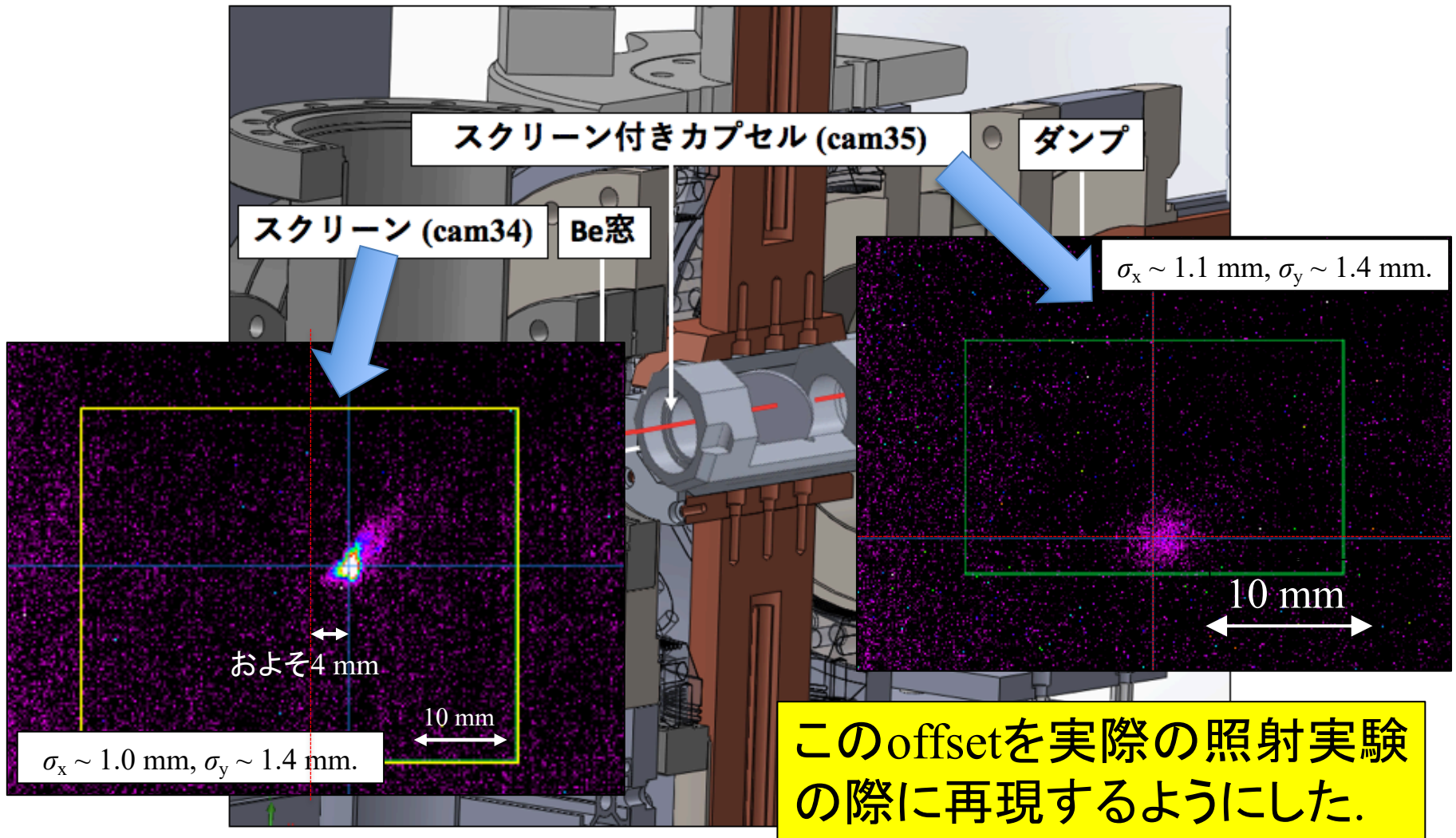
### ・スクリーン付きカプセルを使用したbeamの調整

beam軸とターゲット中心がずれていることを懸念し、スクリーン付きカプセルを用意、試料表面でのbeam位置を調べた。



## 4. 2019年6月期の照射実験

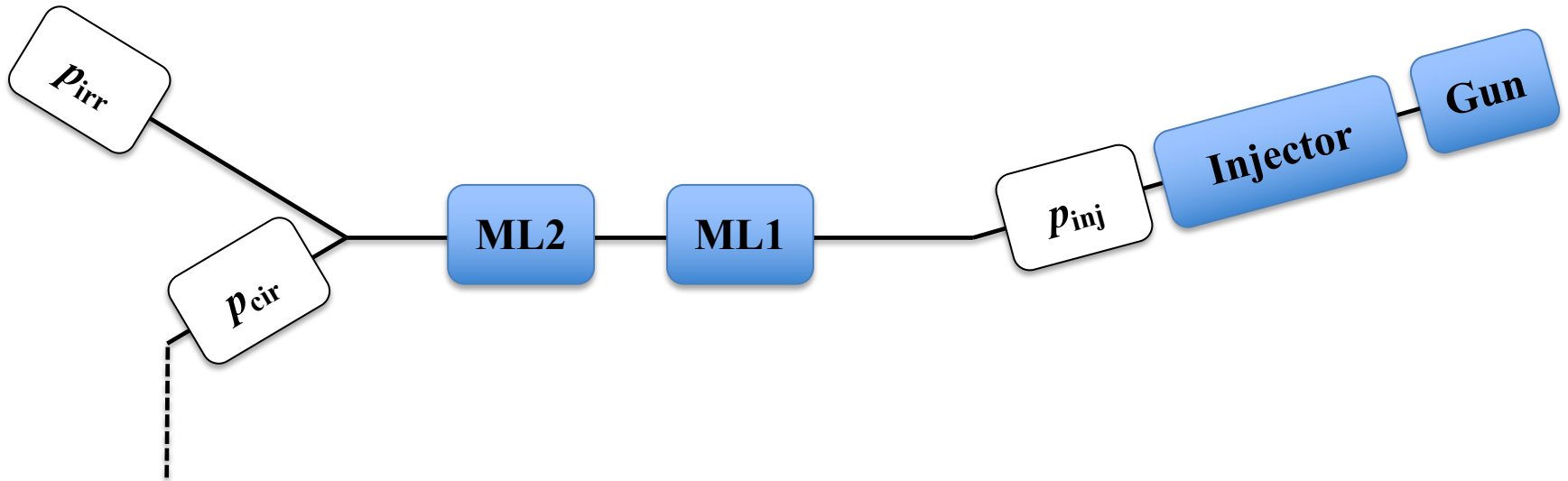
### ・スクリーン付きカプセルを使用したbeamの調整



## 4. 2019年6月期の照射実験

### ・エネルギーの掃引

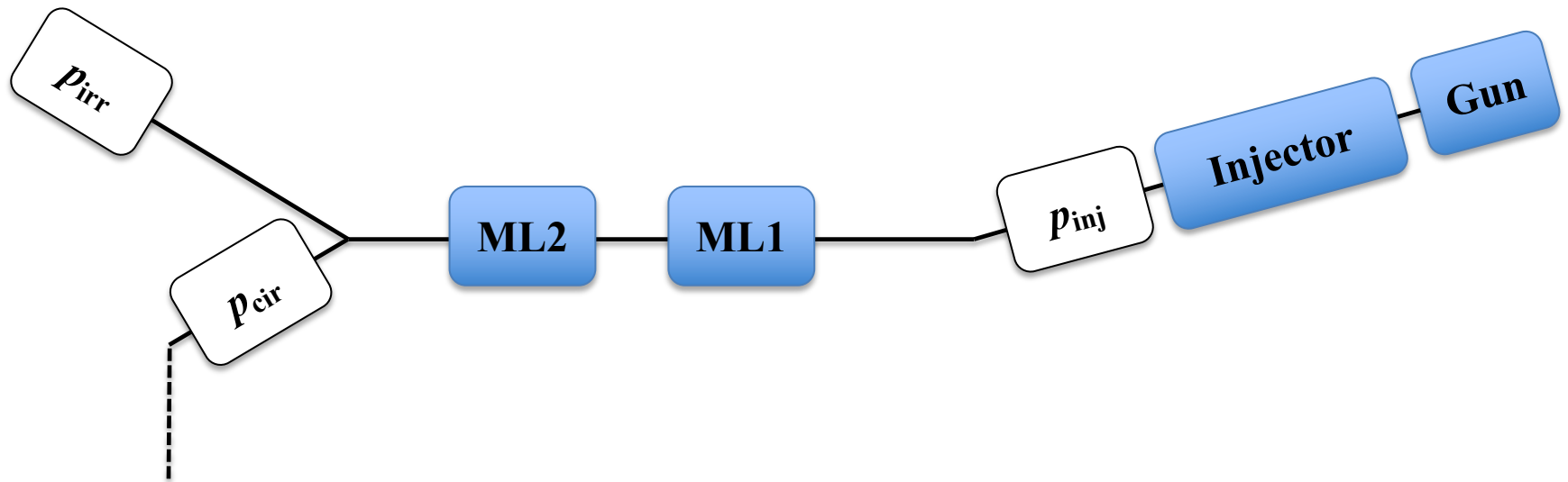
$^{99}\text{Mo}$ 生成効率のエネルギー依存性を調査するため、 $11.5 \text{ MeV}/c$ から $19.5 \text{ MeV}/c$ を $2 \text{ MeV}/c$ 刻みで照射。



- ・ $17.5 \text{ MeV}/c$ の設定を基準に、ML2を下げる。
- ・ $19.5 \text{ MeV}/c$ については入射空洞も上げて、 $p_{inj}$ とML2を上げる。

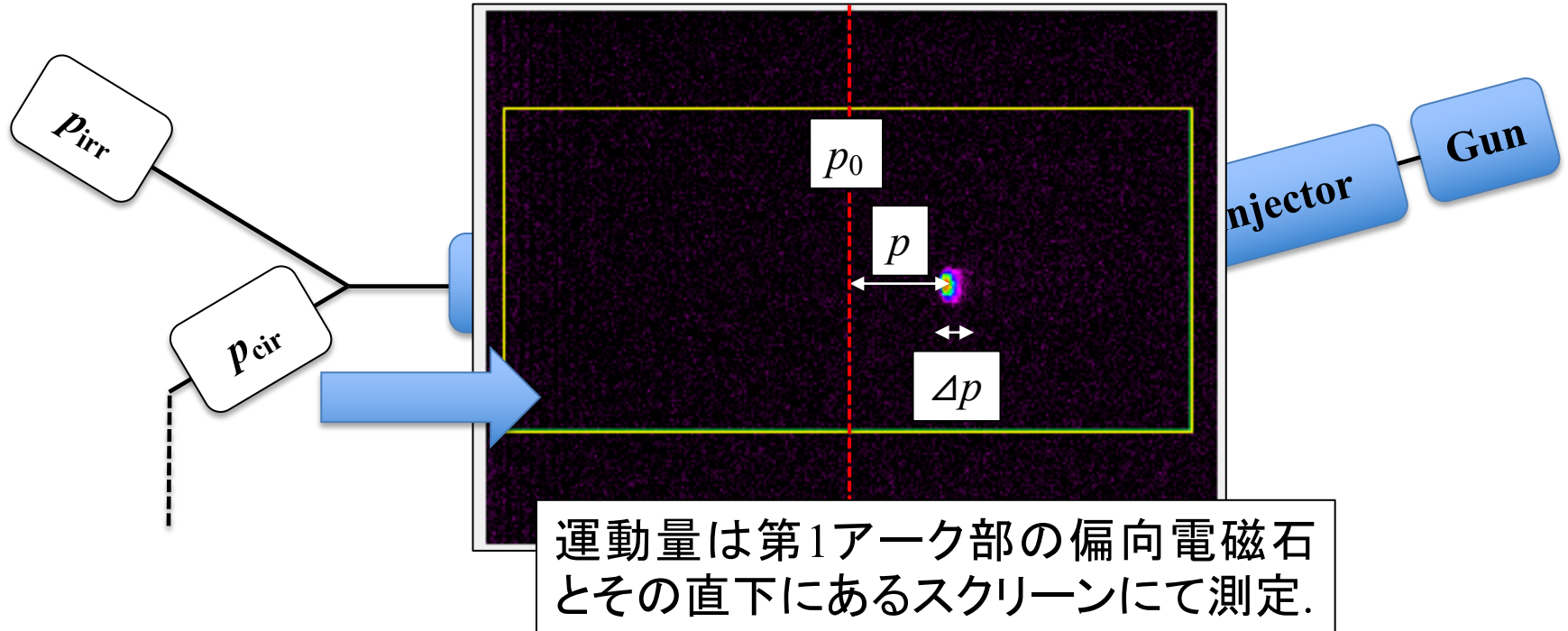
## 4. 2019年6月期の照射実験

・エネルギー (運動量) の安定度と測定誤差



## 4. 2019年6月期の照射実験

### ・エネルギー (運動量) の安定度と測定誤差



運動量の誤差は 1.6 % + 0.01 MeV/c + 0.062 %

主に電磁石の磁場に起因する系統誤差

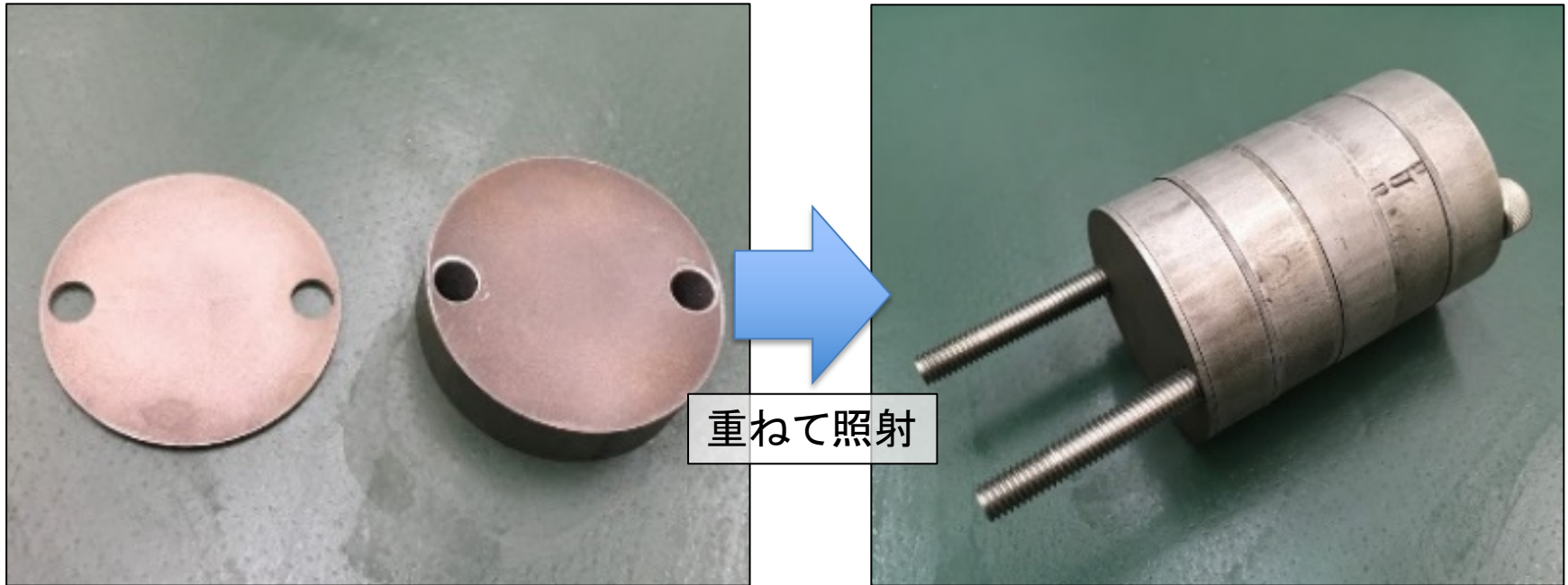
安定度

beamsizeから計算される $\Delta p$

## 4. 2019年6月期の照射実験

### ・ Moによるbeam profileの評価

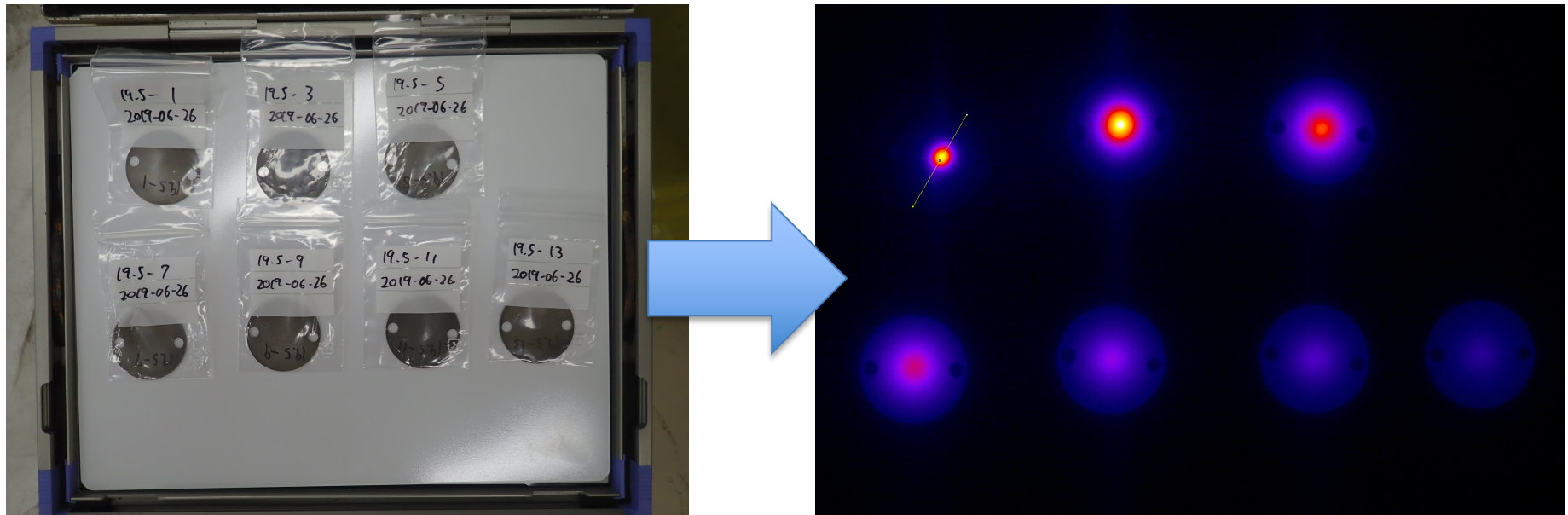
φ35 mm, 1 mm厚と9 mm厚のdisk型試料を7セット試料カプセルに入れ, 照射



## 4. 2019年6月期の照射実験

### ・ Moによるbeam profileの評価

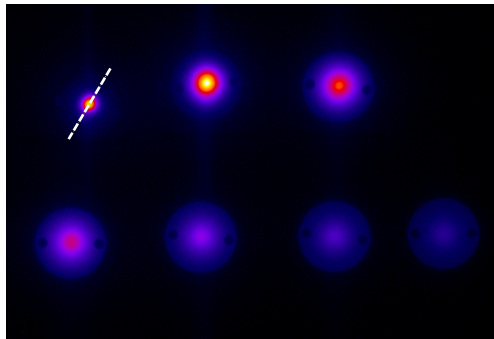
1 mm厚試料におけるMoの放射化分布をImaging Plateで測定.



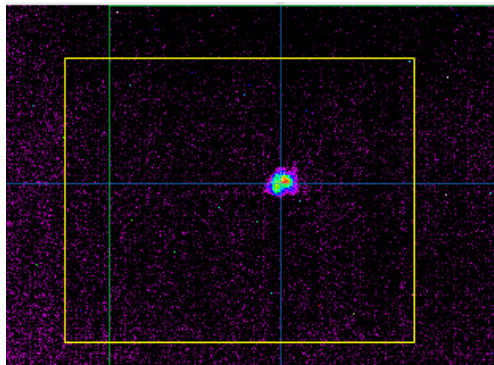
$p = 19.50 \text{ MeV}/c$ の時のMo試料

## 4. 2019年6月期の照射実験

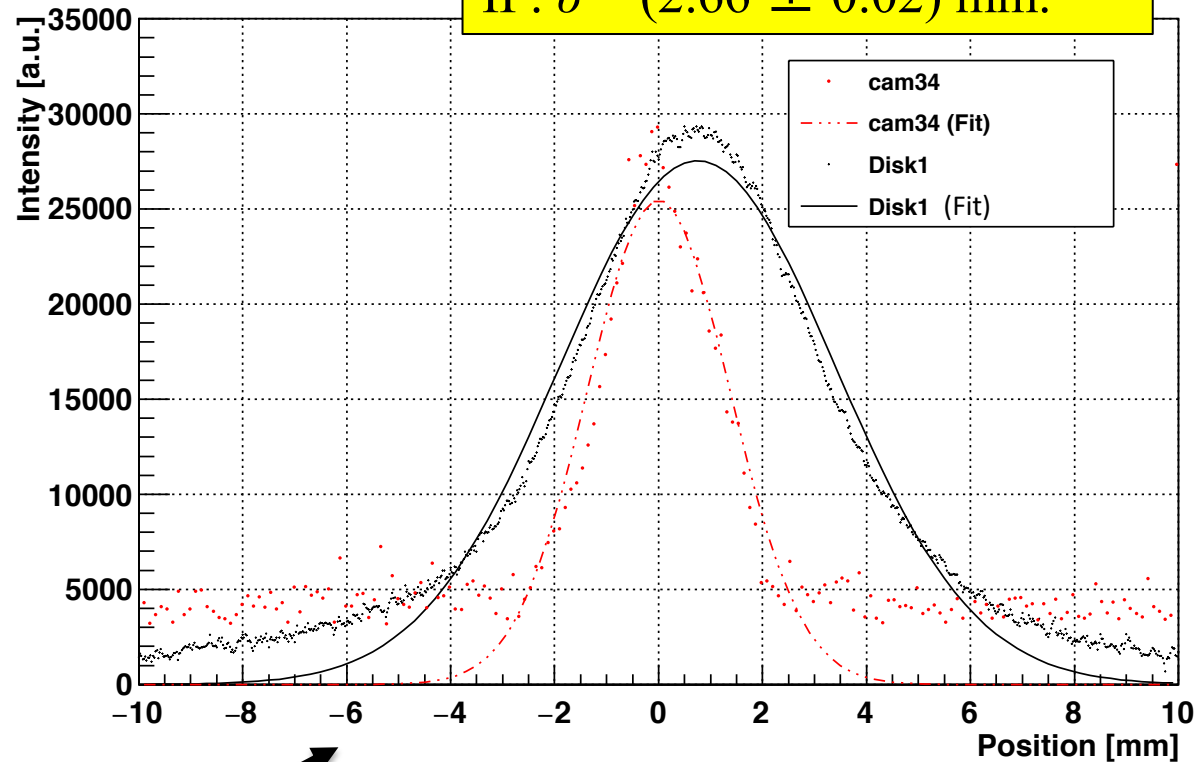
### Moによるbeam profileの評価



最上流のdisk1のIP



cam34でのbeam profile.



IPの中心が0.75 mm程度ずれているが, beam-sizeとdiskの直径 $\phi 35$  mmを考えれば許容範囲.



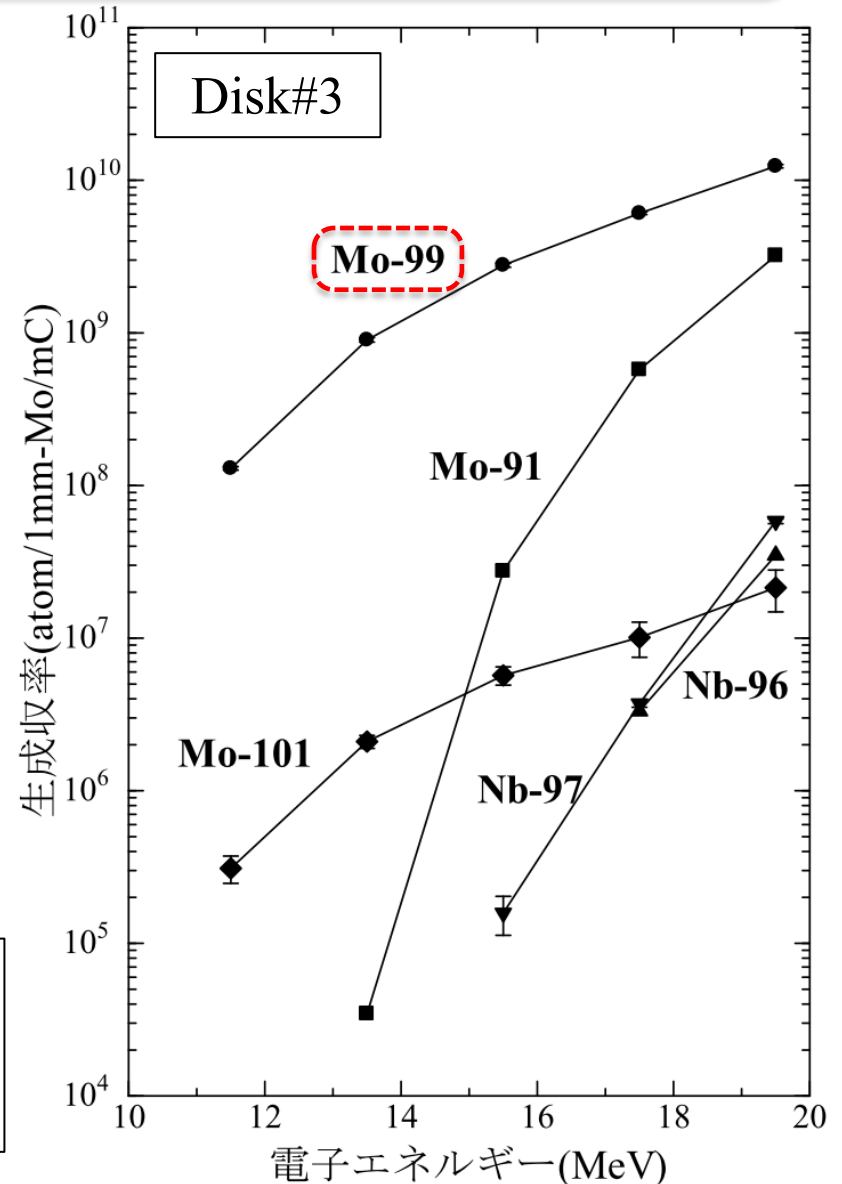
## 4. 2019年6月期の照射実験

### ・ Mo照射実験の結果 (一例)

RI生成収率のエネルギー依存性

20 MeV/c程度の運動量において、<sup>99</sup>Mo以外の不純物となる他の核種の生成量が相対的に小さく、製薬材料及び放射性廃棄物の観点から電子ビームにおける<sup>99</sup>Mo生成において望ましい運動量領域であることが示された。

詳しくは7/31(水)のポスター, 森川 祐,  
“cERLにおけるRI製造、電子線照射ライン  
の建設と照射試験報告”, WEPH015

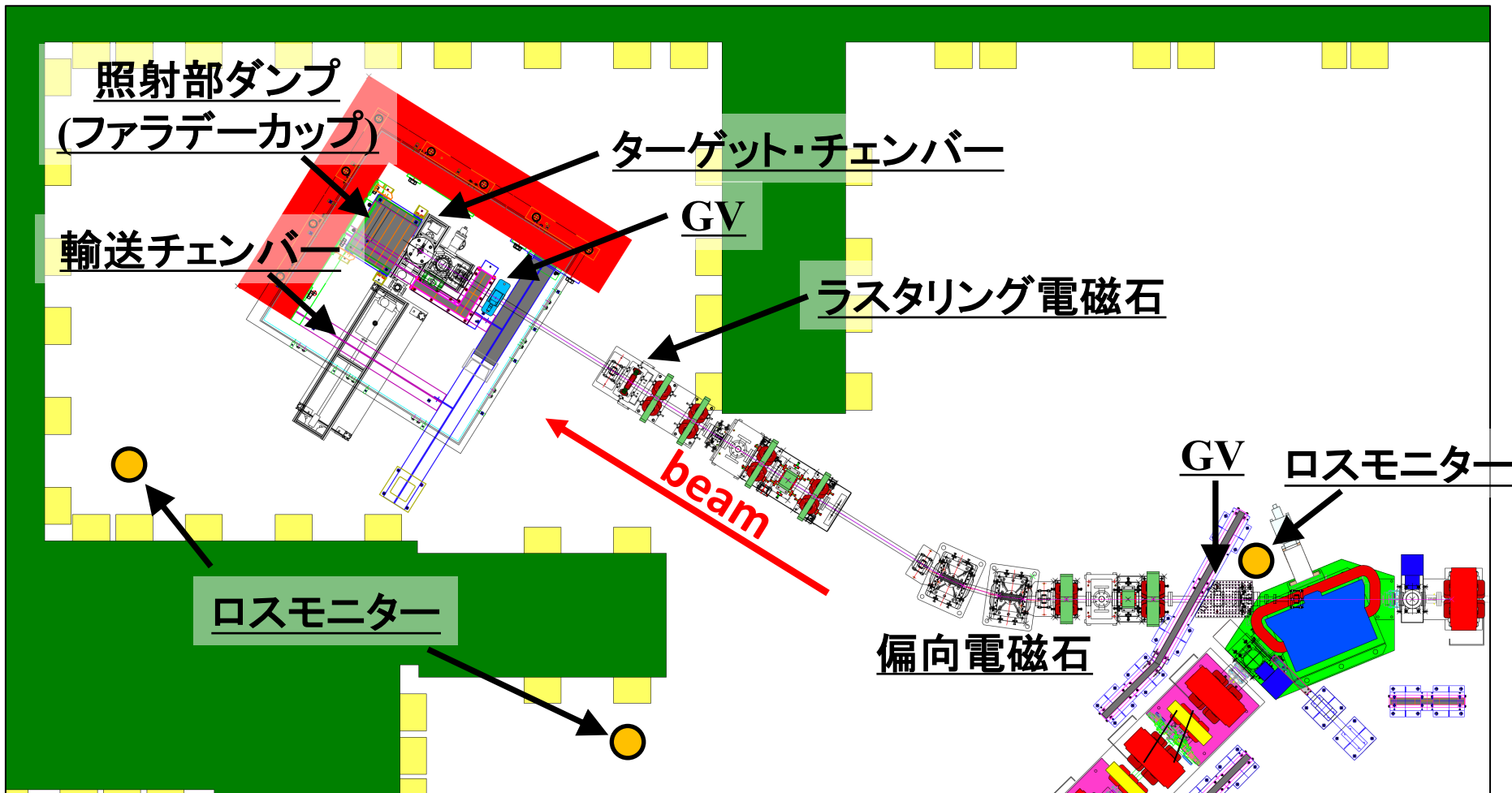


# 本日の発表内容

1. イントロダクション
2. 照射ビームラインの概要
3. 2019年4月期コミッショニング
4. 2019年6月期の照射実験
5. まとめ
6. 今後の予定

## 5. まとめ

- ・2018年からcERLを利用した照射実験計画が開始.
- ・ $^{99}\text{Mo}$ の生成やアスファルトなどを照射できるビームラインが建設された.



## 5. まとめ

- ・2018年からcERLを利用した照射実験計画が開始.
- ・ $^{99}\text{Mo}$ の生成やアスファルトなどを照射できるビームラインが建設された.

照射部ダンプ  
(ファラデーカップ)

輸送チェンバー

1. beam sizeの可変性	20 mm超まで可 (ラスタリング使用)
2. lossの低減	照射後の試料取り出しに支障なし.
3. 照射エネルギーの可変性	2%以下の誤差で調整可.
4. 周回部運転との共存	引き継ぎ1時間以下で可能.

照射ビームラインの要求仕様達成.

GV ロスモニター

	エネルギー回収 リニアック開発研究及び応 用研究	電子ビームを使用した 放射性同位元素の製造	理化学的 研究
最大エネルギー	26 MeV	21 MeV	10 MeV
最大電流	1 mA	10 $\mu\text{A}$	10 $\mu\text{A}$

今回追加されたcERLの使用目的.

# 本日の発表内容

1. イントロダクション
2. 照射ビームラインの概要
3. 2019年4月期コミッショニング
4. 2019年6月期の照射実験
5. まとめ
6. 今後の予定



# 謝辞

本照射実験は株式会社アクセルレーターとの受託研究委託により行われております<sup>[1]</sup>。またRI製造に関しては株式会社千代田テクノル<sup>[2]</sup>、アスファルト照射実験に関しては東亜道路工業株式会社との共同研究になります<sup>[3]</sup>。照射実験におけるRI生成・解析・貯蔵に際しましてKEK放射線科学センターに、また、試料と治具、及びビームダンプの製作・加工に関してKEK機械工学センターに感謝の意を表したく存じます。最後に、cERLの運転に際しまして、cERL collaborationに御礼申し上げます。

---

[1] 株式会社アクセルレーター, <https://www.accelerator-inc.com>, 2019

[2] 株式会社千代田テクノル, <http://www.c-technol.co.jp>, 2019

[3] 東亜道路工業株式会社, <https://www.toadoro.co.jp>, 2019

**ご清聴ありがとうございました。**