

# 若狭湾エネルギー研究センターにおける 宇宙機器の放射線耐性評価の実施 (模擬宇宙線照射技術の開発)



(公財) 若狭湾エネルギー研究センター  
研究開発部次長 (照射支援室長・粒子線医療研究室長)  
久米 恭

## 協力者（敬称略）

WERC 所長  
研究開発部

岩瀬彰宏  
羽鳥聡 石神龍哉 鈴木耕拓

企画支援広報部

山東新子 水嶋慧  
植村勝 湧口卓

福井大  
セーレン（株）

青柳賢英  
中村博一 沢崎浩史 荒井肇

福井県工業技術センター  
宇宙航空研究開発機構

松井多志ほか多数  
今泉充ほか多数

日本原子力研究開発機構  
東京大学宇宙線研究所

鳥居建男  
瀧田正人

ハセテック

長谷川崇

その他 共同研究

東大・金沢大・東工大・名大・阪大・広島大  
・九工大・早稲田大・青学大・理研・三菱電機

# 内容

- 1、動機（宇宙産業の動向と放射線耐性評価試験）
- 2、若狭湾エネルギー研究センター(WERC)における放射線耐性評価試験
- 3、イオンビームを活かした宇宙産業創成事業
- 4、まとめ

# 1、動機（宇宙産業の動向と放射線耐性評価試験）

# 1、動機（宇宙産業の動向と放射線耐性評価試験）

## 3. 世界の宇宙産業の動向

- 世界の宇宙関連の民間産業は、過去5年間で毎年平均10%を超える勢いで成長、今年年間13兆円規模のマーケット。
- マーケットは大きく分けて、①静止衛星(通信放送)②低中軌道衛星(リモートセンシング)③ロケット打上げサービスの3つの市場がある。



過去5年間の宇宙関連の民間産業の市場規模

(出典: Satellite Industry Association State of the Satellite Industry Report(2011)を基に作成)

# 1、動機（宇宙産業の動向と放射線耐性評価試験）

## 宇宙機の分類

打ち上げ時→ロケット

打ち上げ後→人工衛星（地球を周回）  
探査機（地球以外の天体を目指す）

着陸後 → 目的地の天体で運用する機器類  
（月面車、飛行士の補助用具等）

# 1、動機（宇宙産業の動向と放射線耐性評価試験）

## 人工衛星の分類

### -大型機

→ 国家プロジェクト、長期間運用  
堅牢性を要求（「枯れた」システム）

### -小型機・超小型衛星

→ 民間参入、運用期間が比較的短い  
新規技術を投入しやすい

人工衛星のシステム→半導体デバイスや素材選定

-基幹部分（姿勢制御、電源等）

-目的遂行のための部分（地上観測、天体観測等）

# 1、動機（宇宙産業の動向と放射線耐性評価試験）

## 半導体に対する宇宙線の作用

シングルイベント効果

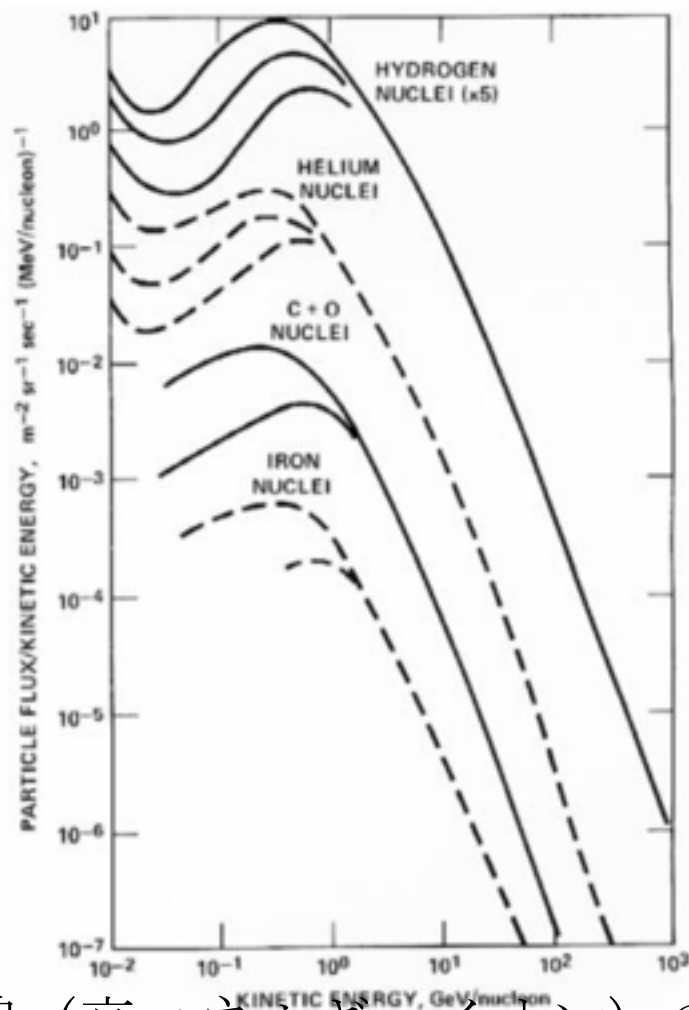
確率的な現象 誤動作

トータルドーズ効果

線量の蓄積により  
電気特性等が変化

はじき出し損傷

線量の蓄積により  
結晶構造自体が破壊



宇宙線（高エネルギーイオン）のエネルギー分布



# 1、動機（宇宙産業の動向と放射線耐性評価試験）

## 地上での放射線耐性評価試験

- ・ シングルイベント評価試験

イオンが電荷として反応する際の評価。

活動領域でのエネルギー・レートも考慮して実施。

必然的にイオン加速器を必要。

- ・ トータルドーズ効果やはじき出し効果の評価試験  
光子線・電子線・イオンビーム利用。

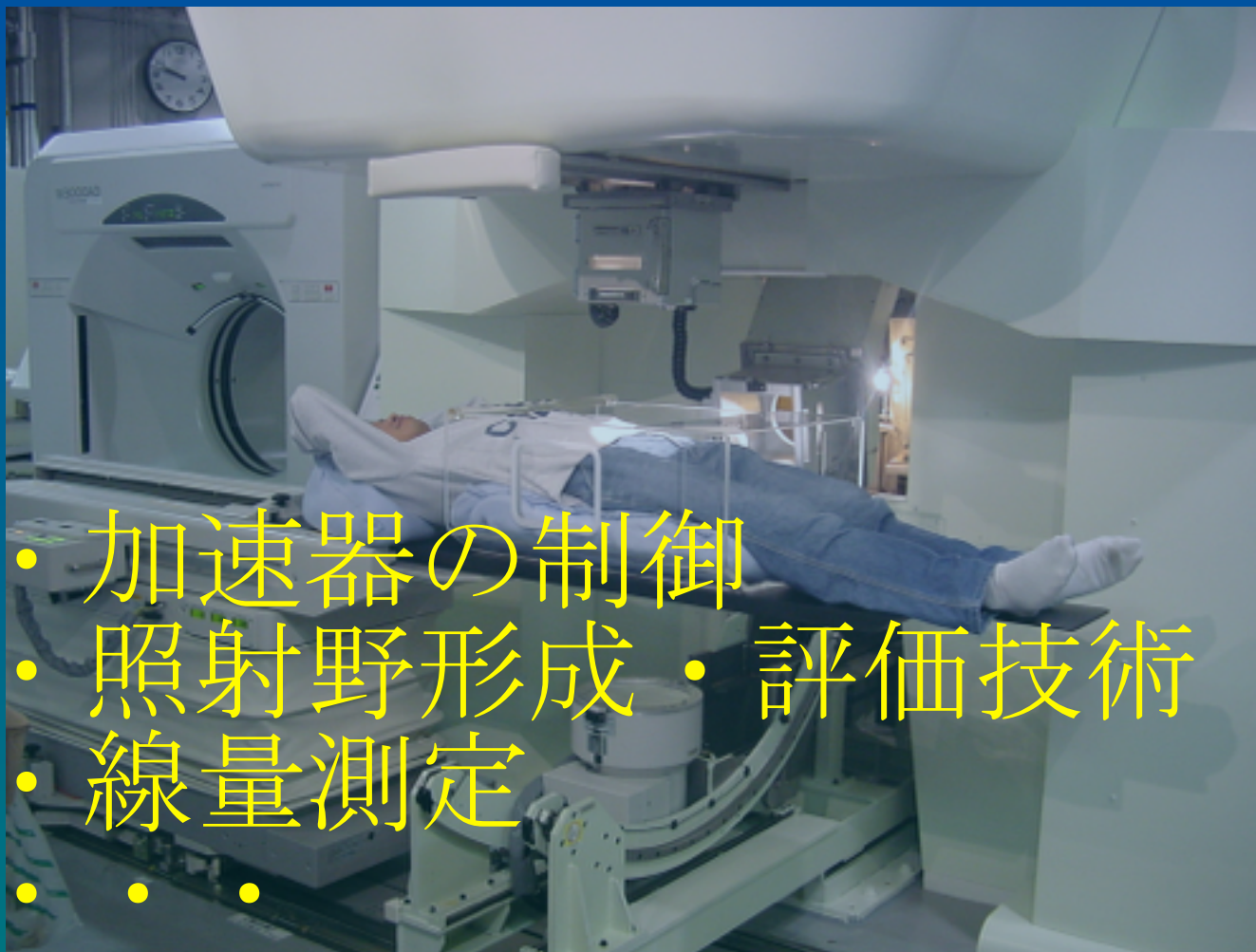
活動領域でのエネルギー・積算線量を考慮。

- ・ 装置側への要求

試料交換実施の容易性（→大気中での実験）。

## 2、若狭湾エネルギー研究センター(WERC)における放射線耐性評価試験

# エネ研には 陽子線治療の経験の蓄積



- 加速器の制御
- 照射野形成・評価技術
- 線量測定
- • •

(前田研究員の発表)

# 陽子線治療

# 宇宙機の試験

治療

宇宙での長期利用

DNA損傷

素子の誤動作・損傷

患部 (患者)

線量計測・制御

ビーム整形・評価

素子

ビーム

加速器

# 若狭湾エネルギー研究センター 多目的イオン加速器システム

大強度イオン注入器  
→宇宙（トータルドーズ、  
はじき出し効果）、材料など

マイクロビーム分析コース

イオン分析コース

マイクロビーム  
生物コース

イオン注入コース  
→宇宙（トータルドーズ、  
はじき出し効果）、  
材料など

シンクロトロン  
（直径10 m）  
陽子エネルギー 200 MeV  
電流値 3 nA程度

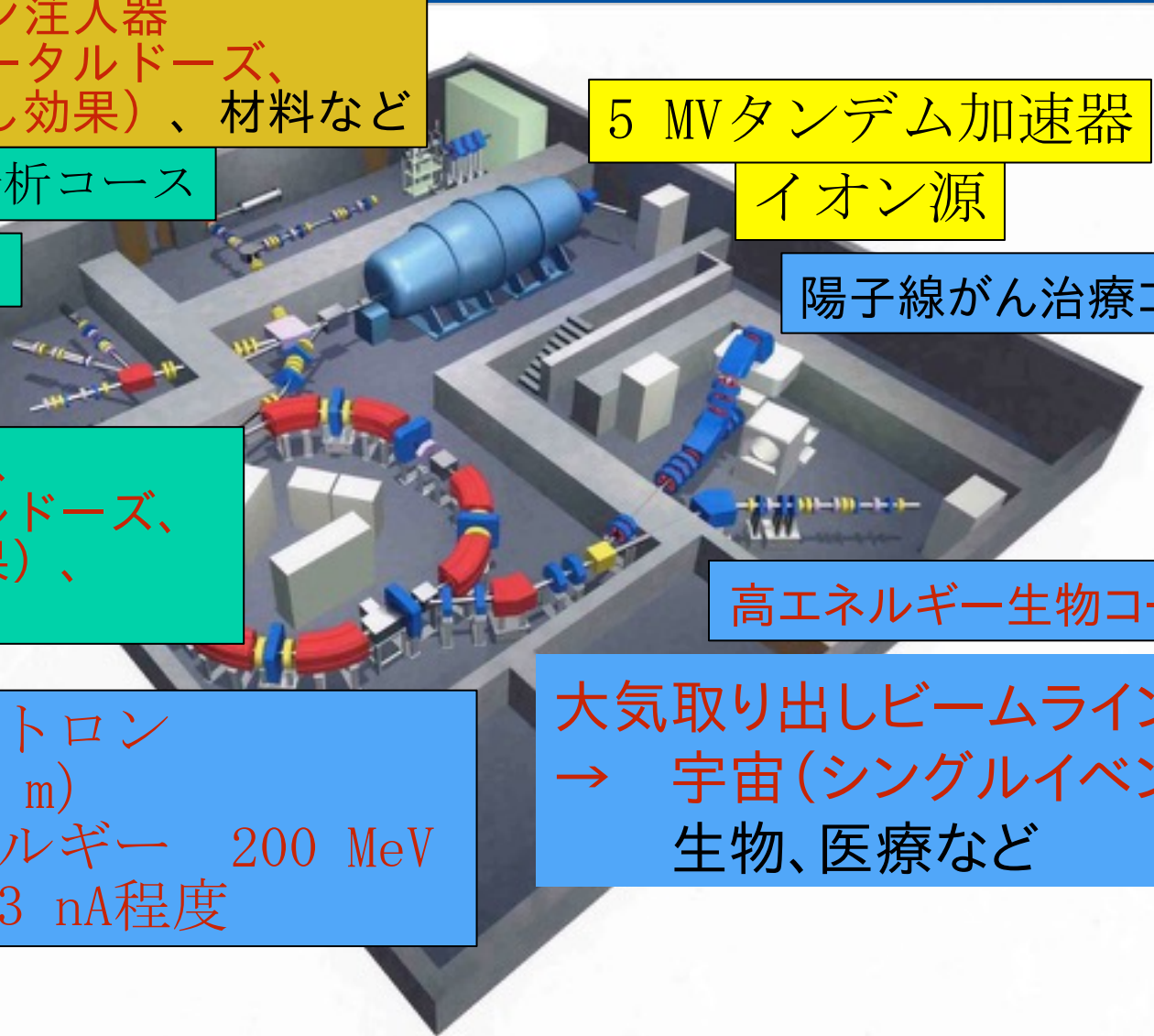
5 MVタンデム加速器

イオン源

陽子線がん治療コース

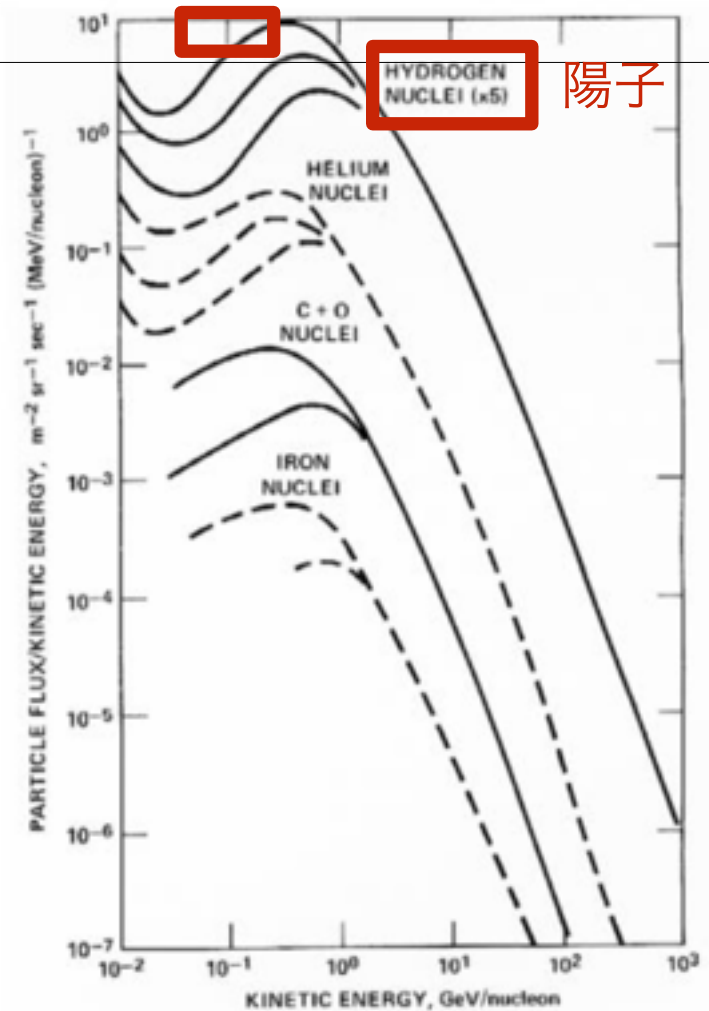
高エネルギー生物コース

大気取り出しビームライン  
→ 宇宙（シングルイベント）、  
生物、医療など

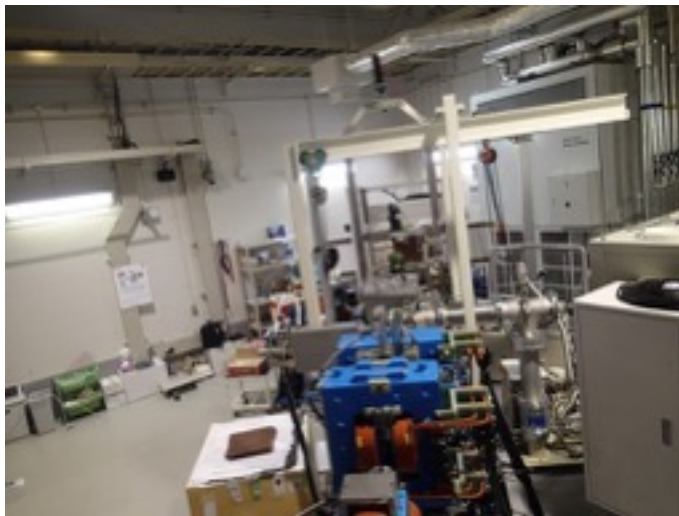


# WERC高エネルギー生物コース 宇宙機搭載機器の放射線耐性試験（シングルイベント） 実施状況

- 宇宙線の主成分は陽子。  
200 MeV近傍にピーク
- WERCシンクロトロンは  
宇宙利用の素子の放射線耐性  
評価に適している。
- ビームを大気に取り出して利用。  
実験実施の容易性↑。



宇宙線のエネルギー分布。



WERC高エネルギー生物コース

# WERCシンクロトロンにおける放射線耐性評価試験

## 加速可能なイオン種一覧

イオン種	加速エネルギー	強度	照射野径	線束
	MeV	nA	mm	particle / cm <sup>2</sup> /s
p	50-200	0 - 3	10 - 120	-10 <sup>8</sup>
He	-220	0 - 0.1	10 - 40?	-10 <sup>7</sup>
C	-660	0 - 0.2	10 - 40?	-10 <sup>7</sup>

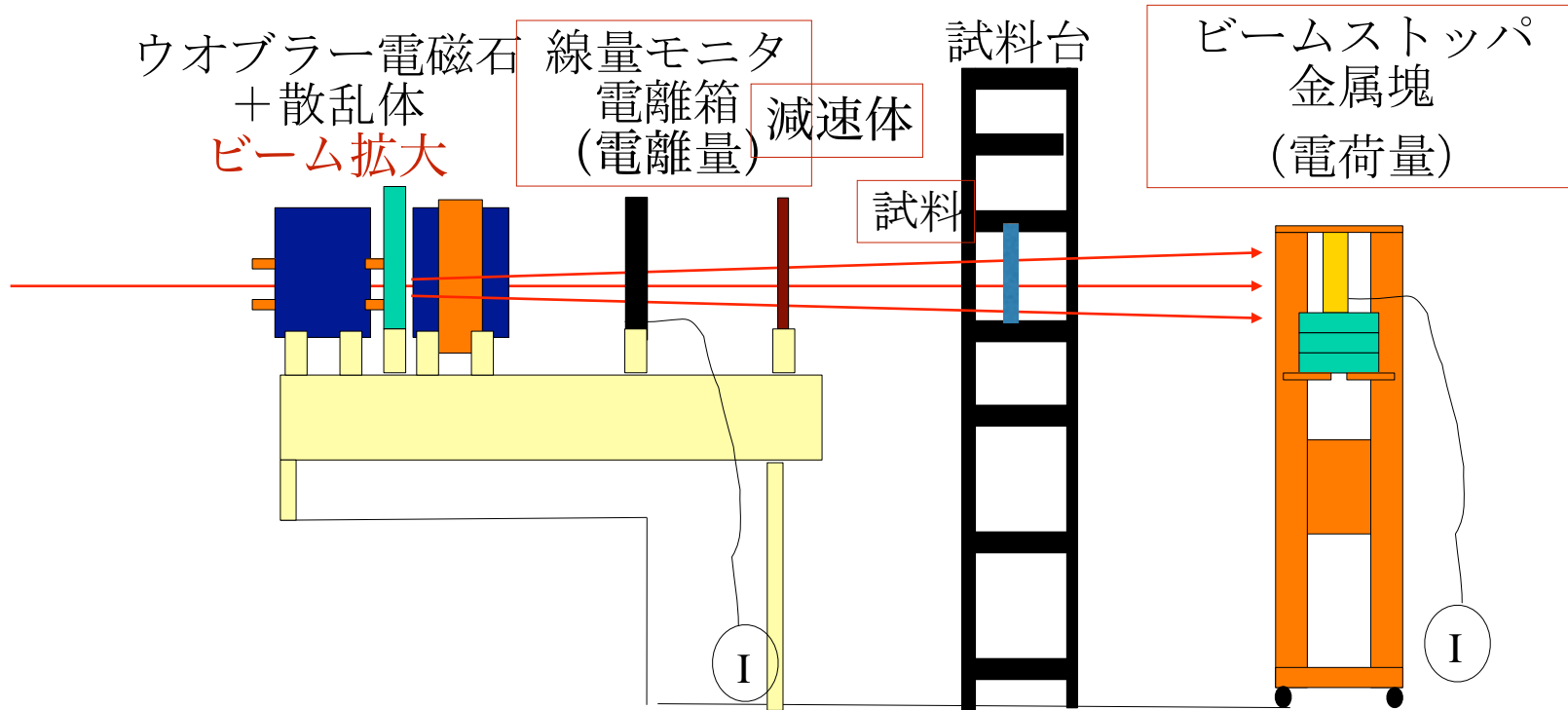
## 照射野形成法

- ・ ペンシルビーム法
- ・ ウオブラー電磁石 + 金属散乱体  
(粒子線治療ブロードビーム法)
- ・ 2次元電離箱線量分布計測器、イメージングプレート

## 照射量計測法

- ・ 電離箱 (吸収線量)      線束に制限
- ・ 金属板 (陽子数)        線束に制限

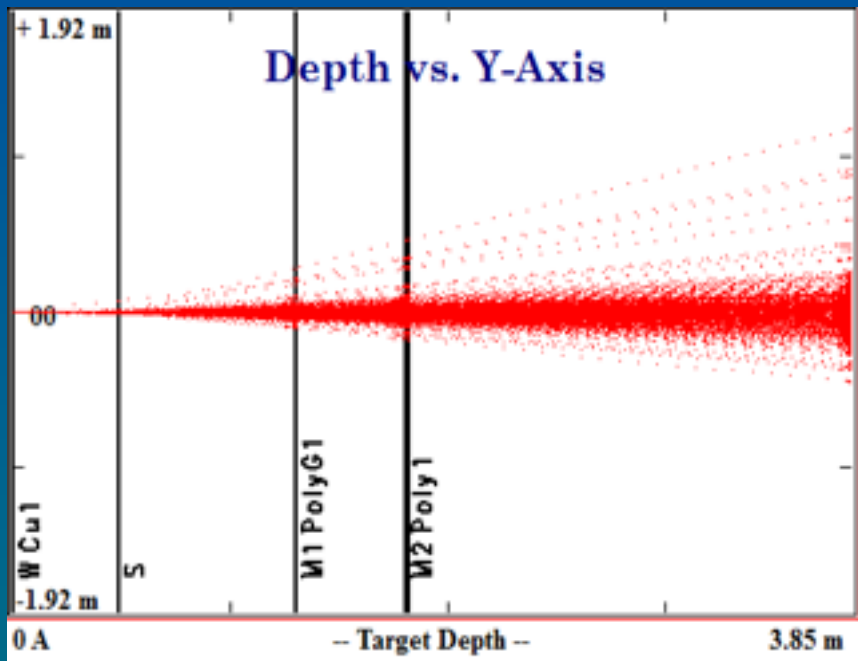
# WERC高エネルギー生物コース 装置配置と試験手順



- 1, 予備試験 (ビーム整形と照射スピード (フラックス) 同定)
  - 1-1 ビームを整形しビームプロファイルを取得・確認  
→ 試料寸法におけるビーム利用効率を得る
  - 1-2 ビームストッパ電荷量と電離箱電離量の相関を得る
  - 1-3 照射スピード (フラックス) を得る
- 2, 本試験 → 青柳先生の発表



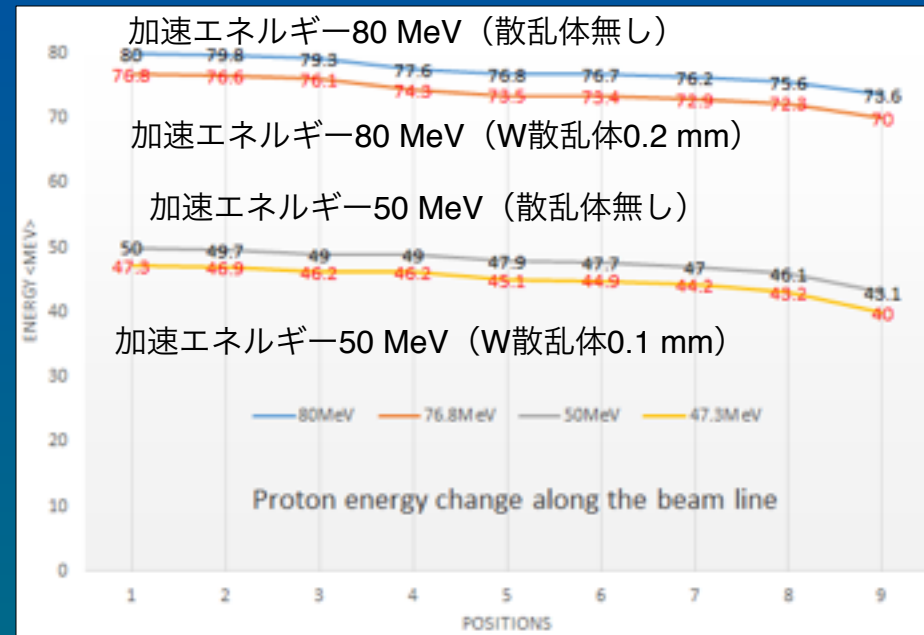
# TRIM計算によるビーム輸送シミュレーション



TRIM計算の模様

(ビームライン上の機器・大気を入力)

ビームの残エネルギー

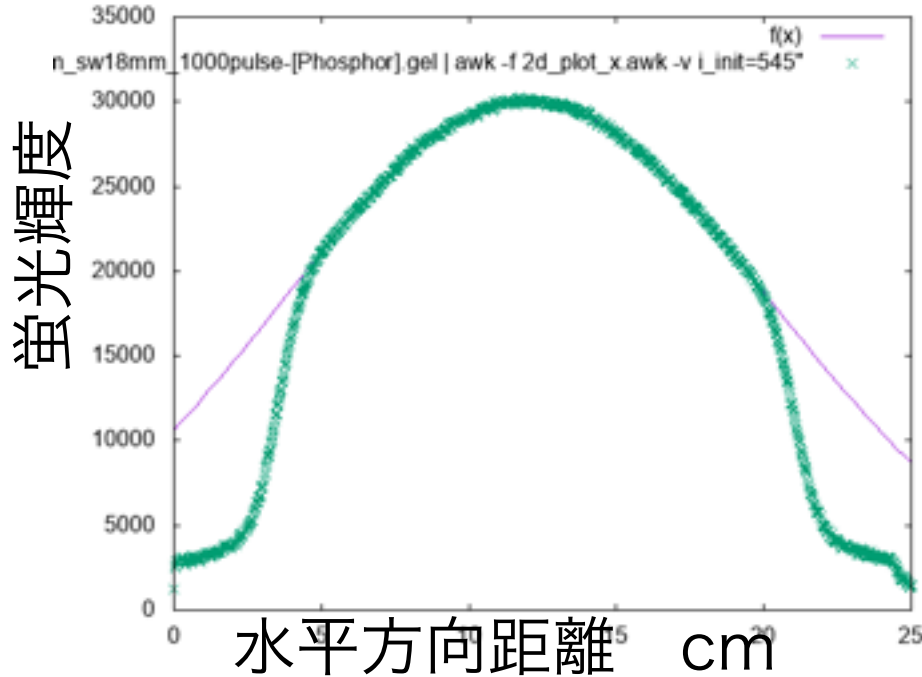


ビーム進行方向の位置により  
ビームエネルギーが減少していく  
(大気によるエネルギー損失)

# 陽子線プロファイルの例

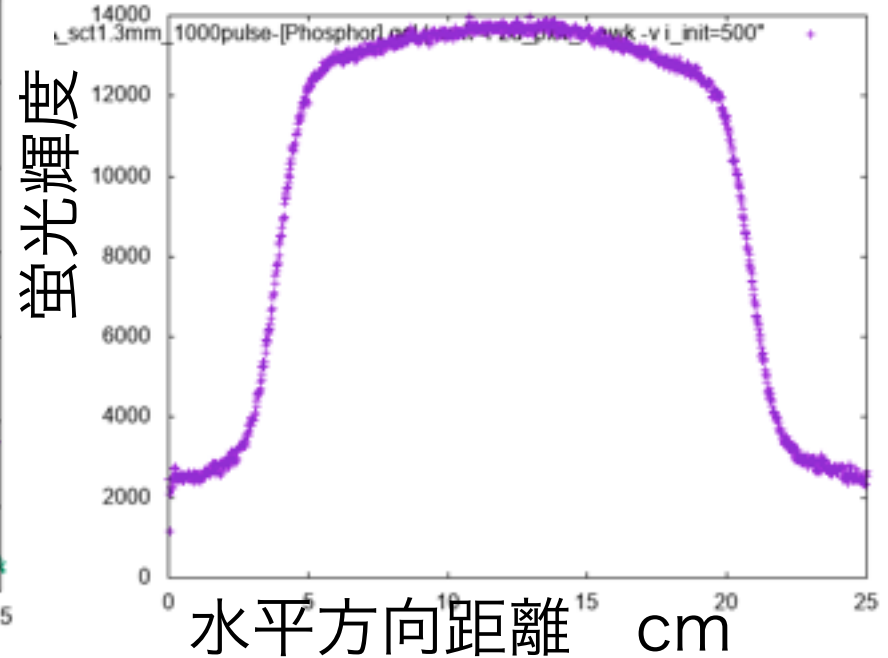
(照射対象面積に応じた照射野形成

・イメージングプレート計測結果)



p 80 MeV

(対象寸法10 cm径)

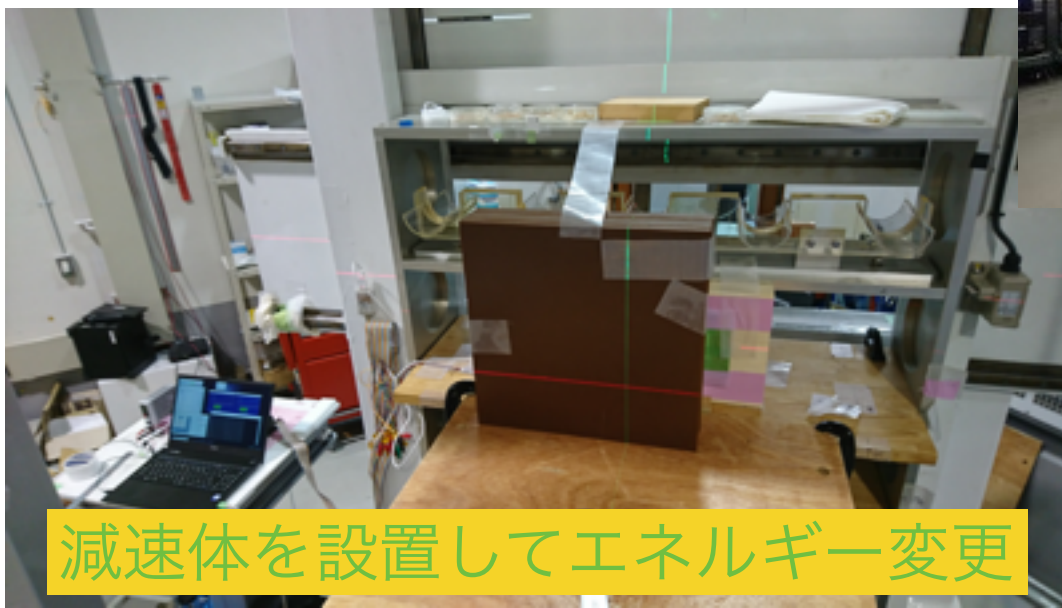


p 100 MeV

(対象寸法5 cm x 5 cm)

フラックス  $1.4 \times 10^6$  p cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>     $6.0 \times 10^6$  p cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

# 試験実施状況



# H31/R元年度 WERCマシンタイム抜粋

## (宇宙開発関係)

宇宙関連マシンタイム(タンデム加速器・シンクロトロン)一覧(H31/R元)						
実施日	種別	機関名	イオン	エネルギー	ビームライン	題目
2019/4/3-4	自主(共研)	JAXA	p	8 MeV	照2イオン注入	プロトンによるCCD素子の劣化
2019/5/8	自主(共研)	名古屋大学	p	200 MeV	照4高エネルギー生物	MPPC(Multi Pixel Photon Counter)の放射線耐性試験
2019/5/23-24	自主(共研)	早稲田大学	p	100 MeV	照4高エネルギー生物	人工衛星搭載用CMOS撮像検出器と民生回路部品の耐放射線シミュレーション
2019/5/30-31	自主(共研)	東京工業大学	p	100 MeV	照4高エネルギー生物	衛星搭載電子デバイス(CPU・CMOSセンサ等)の放射線耐性評価試験
2019/6/28	自主(共研)	名古屋大学	He	220 MeV	照4高エネルギー生物	超小型衛星搭載電子部品やセンサーの宇宙線耐性試験
2019/7/11-12	自主(共研)	九州工業大学	C	660 MeV	照4高エネルギー生物	宇宙用電子機器の高エネルギー荷電粒子耐性の確認
2019/7/26	自主(共研)	JAXA	p	8 MeV	照2イオン注入	プロトンによるCCD素子の劣化
2019/9/18	依頼	A社	p	70 MeV	照4高エネルギー生物	宇宙環境に応じた量の陽子を試料に照射し、試料に変位損傷を発生させる
2019/9/25	自主(共研)	東京大学	p	100 MeV	照4高エネルギー生物	電子基板への照射
2019/10/25	自主(共研)	東京工業大学	p	100 MeV	照4高エネルギー生物	衛星搭載電子デバイス(CPU・CMOSセンサ等)の放射線耐性評価試験
2019/10/30	自主(共研)	名古屋大学	p	200 MeV	照4高エネルギー生物	超小型衛星搭載電子部品やセンサーの宇宙線耐性試験
2019/11/7-8	自主(共研)	九州工業大学	p	200 MeV	照4高エネルギー生物	宇宙用電子機器の高エネルギー荷電粒子耐性の確認

共同研究→主として学術機関と共同で実施 照射技術を開発

依頼照射→主として民間企業が利用 照射技術を応用

→ この取り組みを地域振興にも反映する

### 3、イオンビームを活かした宇宙産業創成事業 (福井県受託事業)

# ふくい宇宙産業創出研究会

会員 県内等63企業（エネ研含む）（事務局は福井県工業技術センター）

東大との共同研究

超小型衛星（県内企業で基幹部分を担当）をすでに3機放出 →青柳先生ご発表

県内に試験設備が充足されている強味

## 超小型人工衛星の試験設備

① 大型電波無響室

② 大動変位振動試験機

③ 熱真空試験機

④ クリーンブース

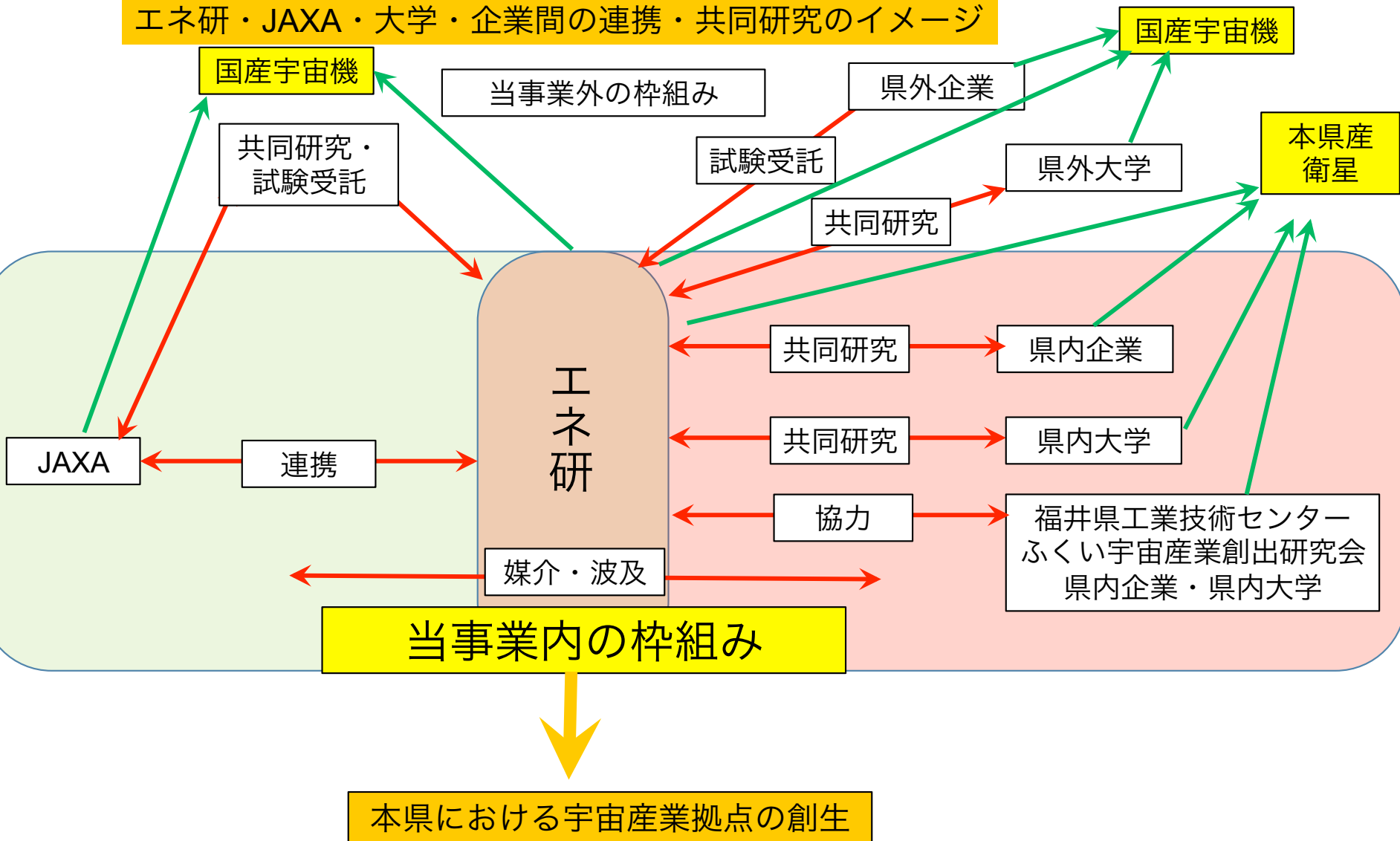
⑤ イオン加速器

県工業技術センター ①②③④

若狭湾エネルギー研究センター ⑤

# イオンビームを活かした宇宙産業創成事業 (福井県受託事業)

エネ研・JAXA・大学・企業間の連携・共同研究のイメージ



# まとめ

- ・ 宇宙産業は現在も伸びが著しい分野で、今後も成長が見込まれる。
- ・ 当法人の多目的イオン加速器システムは、宇宙機開発には不可欠な、国内で有数の装置である。  
この特性を活用し、宇宙分野の研究開発を実施している。
- ・ 地元企業・大学等との共同研究、JAXAとの連携協定を通じ、宇宙開発分野への寄与により、今後さらなる地域振興に貢献していく。



ご清聴ありがとうございました。