

# 中性子発生用小型省電力加速器

～設計開発状況御紹介～

## 目次

I. 製品コンセプト	2ページ
II. 中性子発生方式	3ページ
III. 分散型加速器	5ページ
IV. 分散型加速器の加速電圧発生方式	6ページ
V. 何故加速効率が良くなるのか	8ページ
VI. 中性子発生用小型省電力加速器の詳細説明	10ページ
VI-1 加速器本体構成	
VI-2 電源構成	
VI-3 制御系構成	
VI-4 加速器シミュレータによる性能検証試験	
VII. 仕様	18ページ
VIII. 今後のスケジュール	21ページ

2010年12月14日

イーエムキューブ株式会社

# I. 製品コンセプト

## 1. 安価であること

- $1.0 \times 10^{12}$  個/秒レベルの中性子源強度を実現できる『中性子発生用小型省電力加速器』を1億円以下の販売価格で提供する。

## 2. 操作が簡単であること

- スイッチをONするだけで必要な量の中性子が発生する。
- 運転維持のための専門的スタッフを不要とする。

## 3. メンテナンスフリー

- 長期間の停止を伴う定期点検保守を不要とする。

## 4. トラック/トレーラによる運搬が可能であること

- 小型かつ軽量。
- 消費電力を小さくし、車載電源ユニットで駆動可能とする。

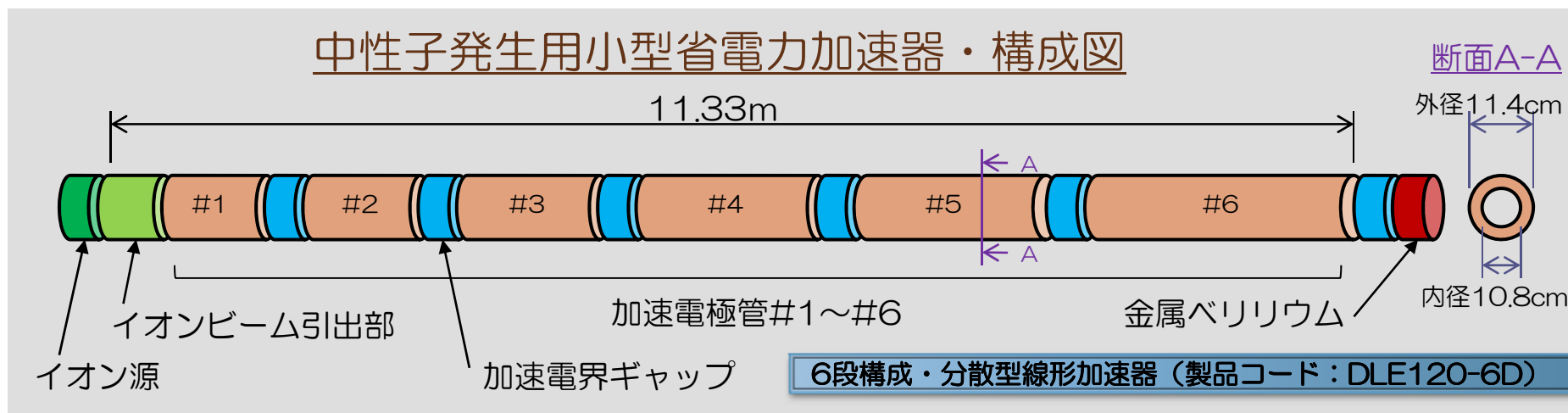
## Ⅱ. 中性子発生方式

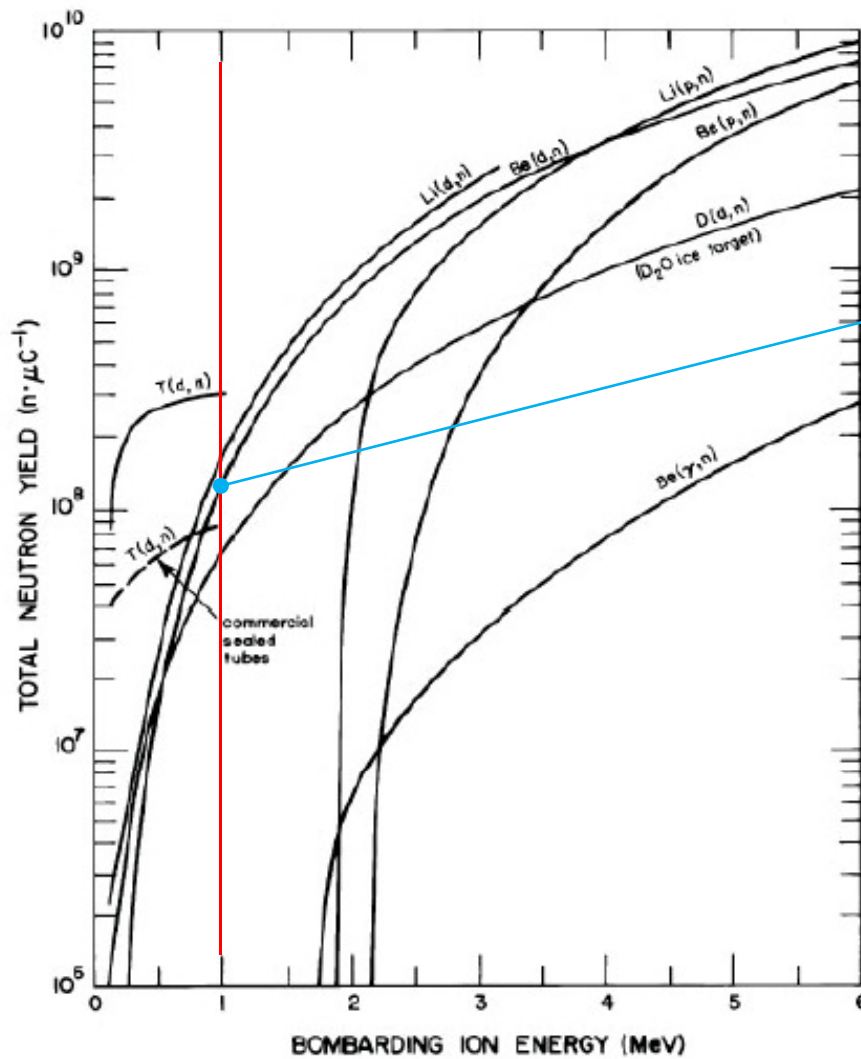
### 1. 中性子発生反応

- 低エネルギー加速で大量の中性子を発生できる『Be(d,n)』を採用する。
- 重陽子 (d) を加速して金属ベリリウムターゲットに照射する。

### 2. 重陽子の加速

- 分散型加速器による線形加速器にて、重陽子を1.08MeVまで加速する。





$$1.2 \times 10^8 \text{ 個} / \mu\text{C}$$

重陽子を 1.08MeVまで加速すると  
平均電流10mA (10,000 μC/秒)  
にて、  
 $1.2 \times 10^{12}$  個/秒  
の中性子yieldを達成できる。

《引用》 M.R. Hawkesworth,  
*Neutron Radiography: Equipment and Methods*,  
Atomic Energy Review 15, No. 2, 169-220, 1977.

## Ⅲ. 分散型加速器

1. イーエムキューブ株式会社にて設計開発した、新しい加速電界発生方式を採用した加速器です。

- 高周波電力を使用せず、直流高圧電源＋半導体スイッチで加速電界を作る

2. 開発設計は、エキスパートの方々から色々なアドバイスを頂きながら、進めて参りました。

- 高エネルギー加速器研究機構（KEK）デジタル加速器グループ

- 東京大学素粒子物理学国際研究センター

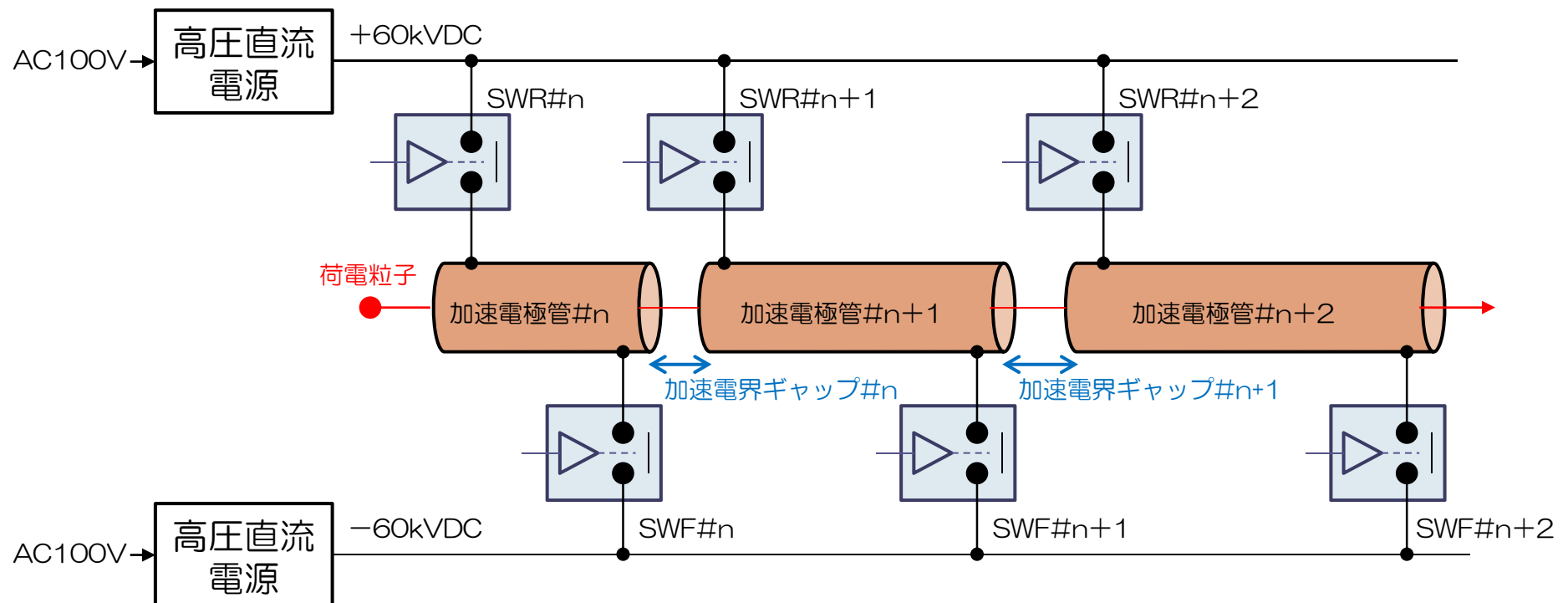


いまだに未解決・未回答の課題・質問事項がありますし、現時点でも宿題を貰い続けながら開発設計を進めています。

3. 一番大きな特長は省電力、具体的には『50%を超える加速効率』を達成できることです。

## IV. 分散型加速器の加速電界発生方式（その1）

- 荷電粒子の通過タイミングに合わせて半導体スイッチをON/OFFすることで、加速電界ギャップで常に120kVの加速が行えるようにする。



SWR、SWFは半導体スイッチ

## IV. 分散型加速器の加速電界発生方式（その2）

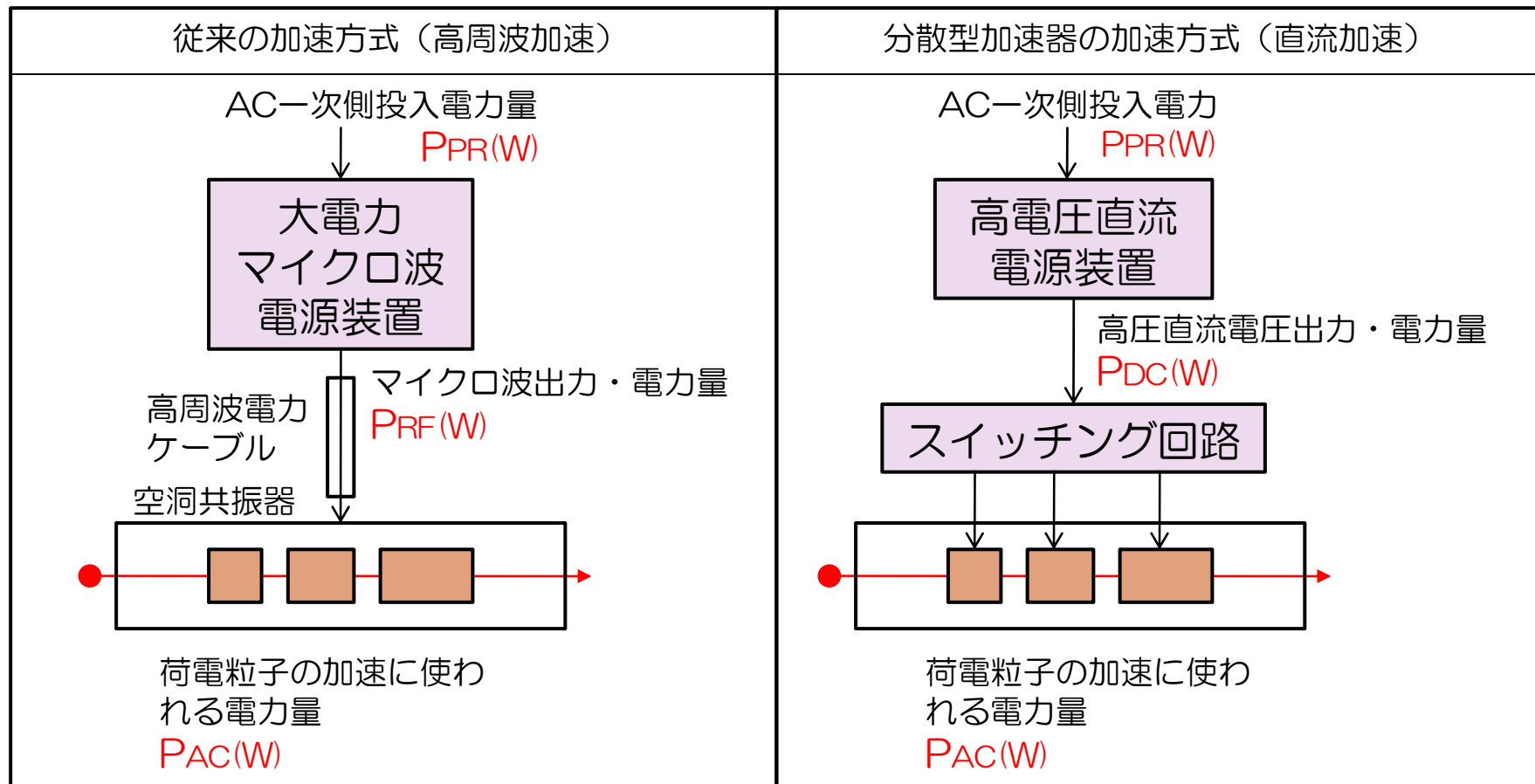
- 被加速荷電粒子が、加速電極管の入口～中心付近に存在するタイミングで半導体スイッチを操作して、加速電極管の電位を切り替えるのがポイント

説明	SWR #n	SWF #n	SWF #n +1	SWR #n +1	SWR #n +2	SWF #n +2	各加速電極管の電位 (黄色 : +60kV、青色 : -60kV)
加速電極管#n内を荷電粒子が一定速度で進んでいる。	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	加速電極管#n: 黄色 (赤丸右向き) 加速電極管#n+1: 青色 加速電極管#n+2: 青色
荷電粒子は加速電界ギャップ#nで加速された後、加速電極管#n+1の入口付近に達する。	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	加速電極管#n: 黄色 加速電極管#n+1: 青色 (赤丸右向き) 加速電極管#n+2: 青色
荷電粒子が加速電極管#n+1の中心付近に来た時、スイッチを操作してその電位を+60kVに切り替える。	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	加速電極管#n: 黄色 加速電極管#n+1: 黄色 (赤丸右向き) 加速電極管#n+2: 青色
荷電粒子は加速電界ギャップ#n+1で更に加速された後、加速電極管#n+2の入口付近に達する。	ON	OFF	ON	OFF	OFF	ON	加速電極管#n: 黄色 加速電極管#n+1: 黄色 加速電極管#n+2: 青色 (赤丸右向き)
荷電粒子が加速電極管#n+2の中心付近に来た時、次の加速に備えてスイッチを操作し、その電位を+60kVに切り替える。	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	加速電極管#n: 青色 加速電極管#n+1: 黄色 加速電極管#n+2: 黄色 (赤丸右向き)

次の荷電粒子に備えて、電位を-60kVにリセットする。

加速電界ギャップ #n      加速電界ギャップ #n+1

## V. 何故加速効率が良いくなるのか（その1）



$$P_{AC}(W) = \text{加速電圧}(V) \times \text{平均加速電流}(A)$$



## V. 何故加速効率が良くなるのか（その2）

### 1. 電源装置の効率

■大電力マイクロ波電源装置

$$P_{RF}/P_{PR} \leq 0.2$$

■高電圧直流電源装置

$$P_{DC}/P_{PR} \geq 0.8$$

### 2. 電力損失

■高周波では、ケーブル／加速管での発熱損失が大きい。

$$P_{AC}/P_{RF} < 1$$

■直流では低電流領域では発熱損失が殆どない。

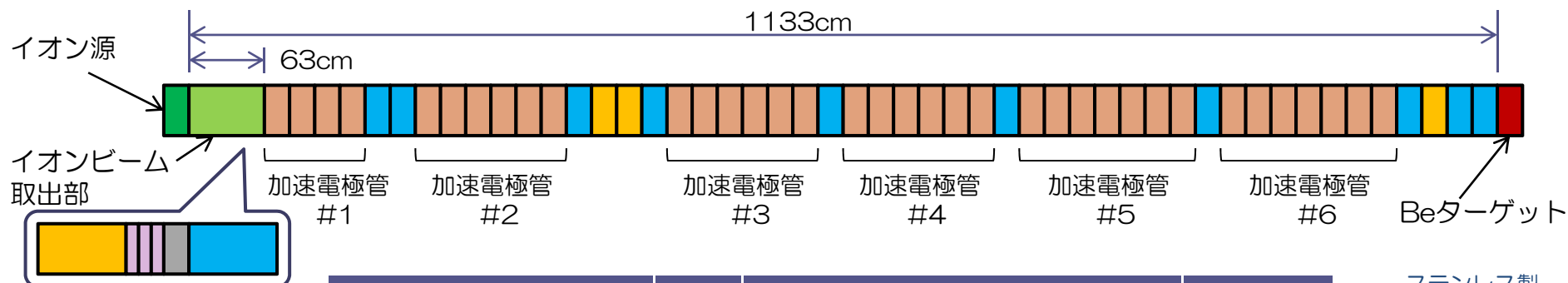
$$P_{AC}/P_{DC} \doteq 1$$



分散型加速器では、 $P_{AC}/P_{PR} \geq 0.8$ を達成でき、加速効率が従来に比べ大きく改善できる。

# VI. 中性子発生用小型省電力加速器の詳細説明

## IV-1 加速器本体構成



イオンビーム取出部詳細

絶縁フランジ

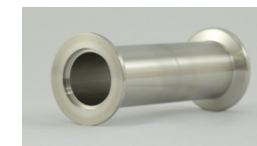


変換フランジ



名称	記号	機能	使用個数
ステンレス製ニップル (NW100)		複数個を連結して、加速電極管を形成する。	36
ガラス製ニップル (NW100)		加速電界ギャップ部分に適用する。	11
ステンレス製ティー (NW100)		接地電位を持った電極管 (ダミー電極管) として適用する。真空ポンプ、真空計の接続用としても利用する。	3
ステンレス製ティー (ICF152)			1
絶縁フランジ (ICF152)		イオンビーム取出部のアインツェルレンズ用電極として適用する。	3
変換フランジ (ICF152→NW100)		イオンビーム取出部 (ICF系) と加速部 (NW系) を接続する。	1

ステンレス製ニップル



ガラス製ニップル



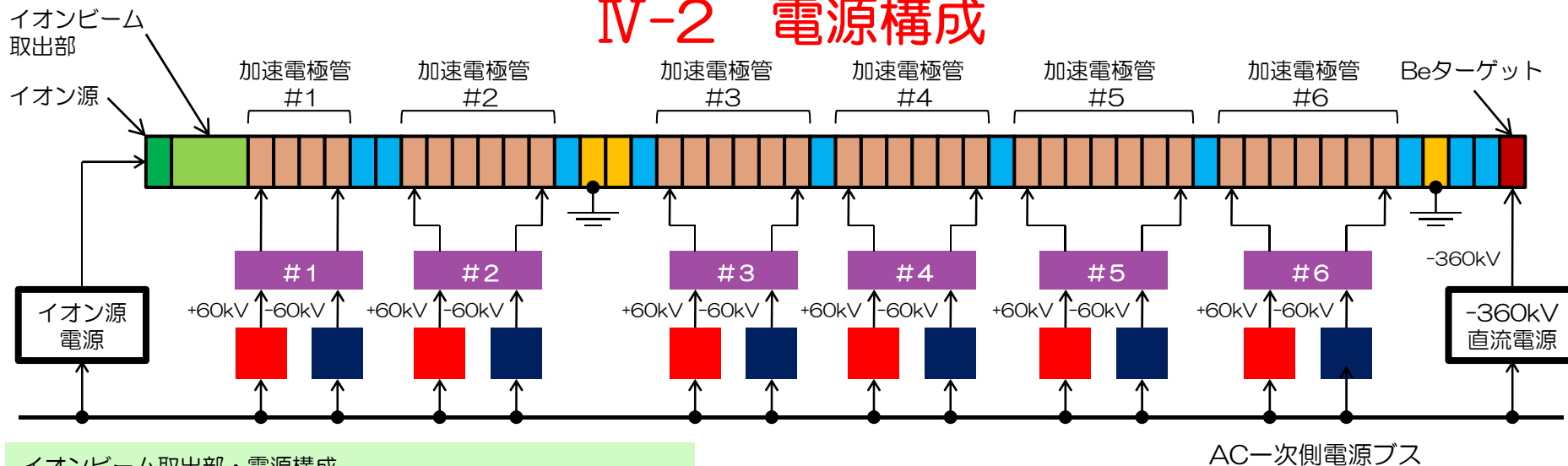
ステンレス製ティー



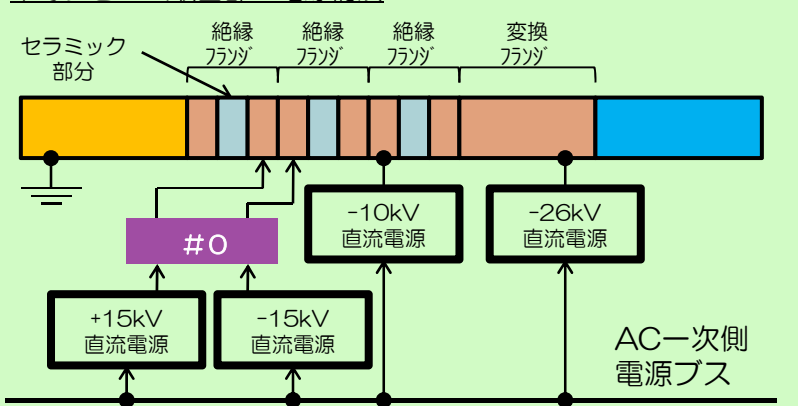
Beターゲット以外は、全て市販標準部品を採用している。

# VI. 中性子発生用小型省電力加速器の詳細説明

## IV-2 電源構成



### イオンビーム取出部・電源構成

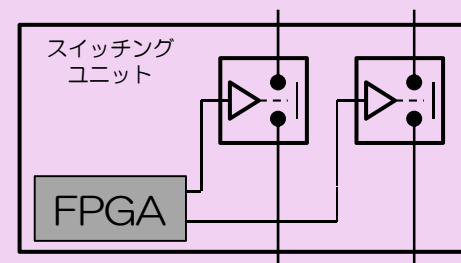


■ +60kV 直流電源

■ -60kV 直流電源

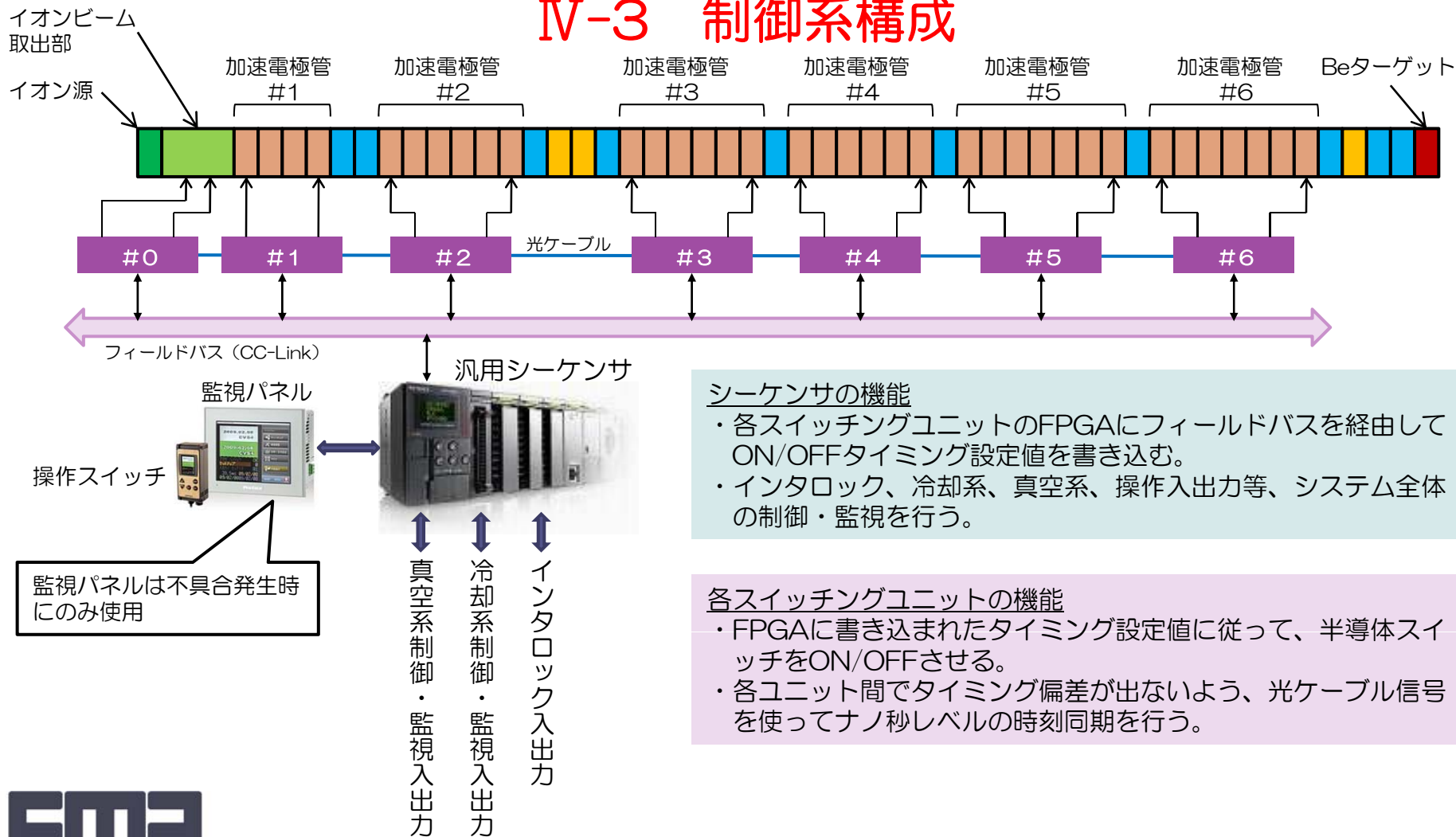
■ #n スイッチングユニット

スイッチングユニットには半導体スイッチが2個収納されており、FPGAからの指令信号によりON/OFFする。



# VI. 中性子発生用小型省電力加速器の詳細説明

## IV-3 制御系構成



# VI. 中性子発生用小型省電力加速器の詳細説明

## IV-4 加速器シミュレータによる性能検証試験（その1）

### 1. ビーム集束の考え方

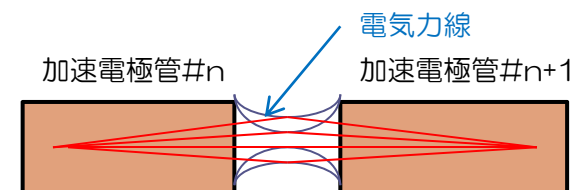
#### ■半径方向（r軸）

加速電界の静電レンズ効果を使って集束する。

#### ■進行方向（Z軸）

ビームの拡大を考慮して、加速電極管の長さを決定する。

（Z軸方向のビーム拡大が、加速制御に悪影響を与えないようにする）



### 2. 加速器シミュレータによる性能検証試験

#### ■加速器シミュレータ

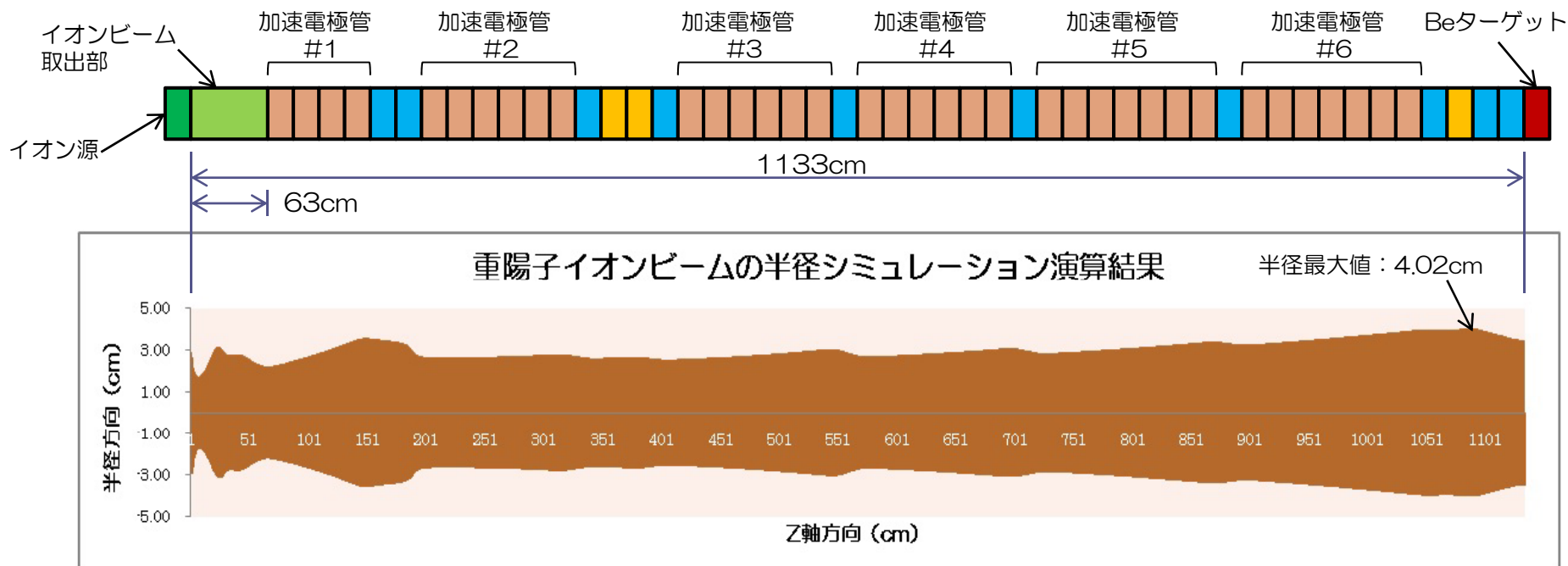
- ・ 加速器内部の空間を2次元（r軸、z軸）でメッシュ分割する。
- ・ 各メッシュに電位、電荷、境界条件等を設定する。
- ・ 各メッシュの電位をポアソン方程式により算出する。
- ・ 算出した電場ポテンシャルから、イオンビームの運動を計算する。

左記の繰返しにより、イオン源からBeターゲットに至るまでのイオンビーム挙動を計算する。

#### ■規定の加速平均電流に対して集束制御が破綻しないことを確認する。

# VI. 中性子発生用小型省電力加速器の詳細説明

## IV-4 加速器シミュレータによる性能検証試験（その2）



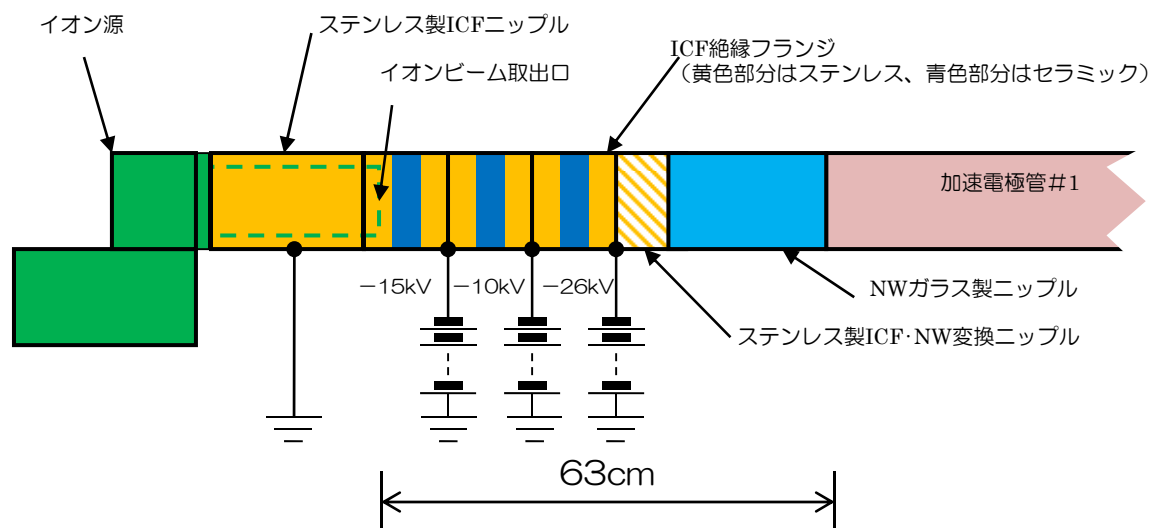
イオン源から引出電流70mA、引出時間250nsにてイオンビームパルスを取り出して、加速した場合の、パルス中央部ビーム半径の推移を計算した結果を示している。



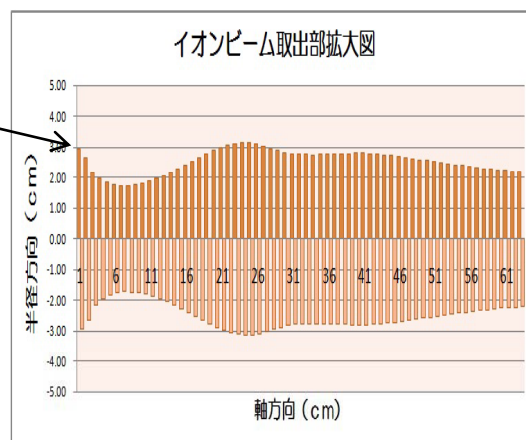
最大半径は4.02cmで、これは加速器内径5.40cmより十分小さな値であり、ビームは外壁に衝突することなく、最終段のBeターゲットまで到達することが確認できた。

# VI. 中性子発生用小型省電力加速器の詳細説明

## IV-4 加速器シミュレータによる性能検証試験（その3）

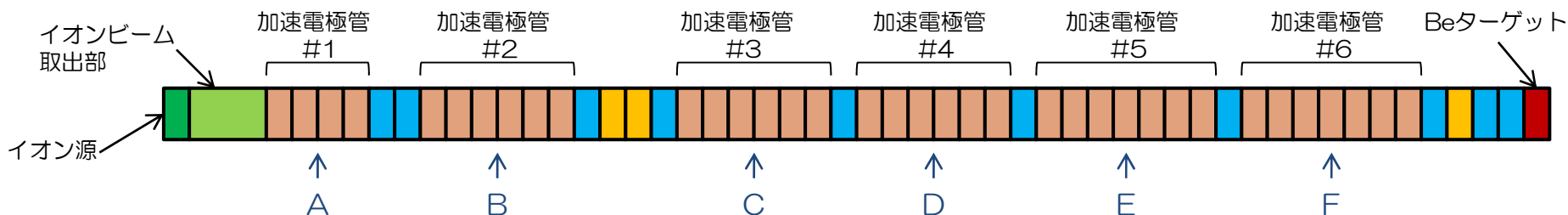


イオン源からは、半径3cmにてビーム取出を行っている。

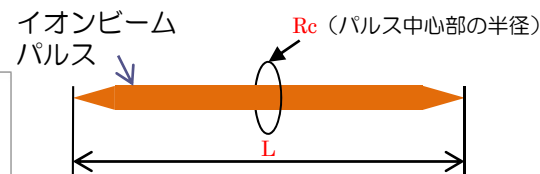
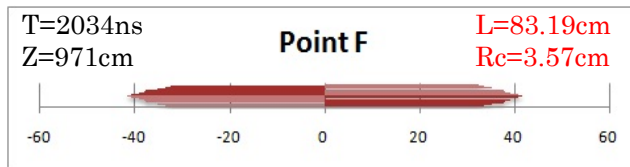
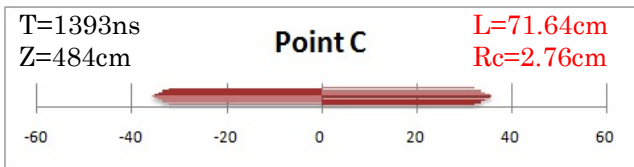
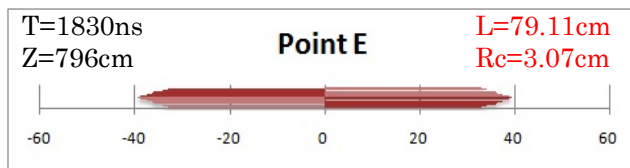
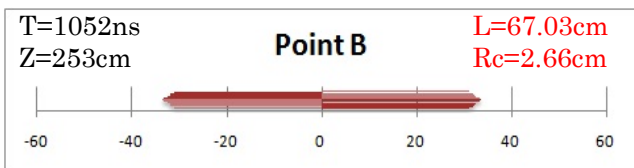
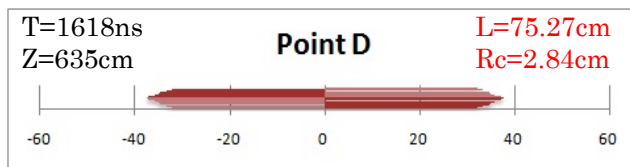
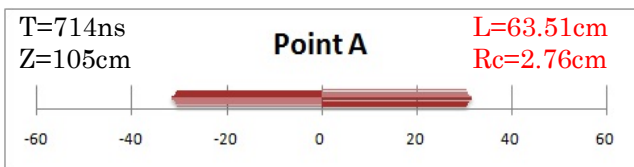


# VI. 中性子発生用小型省電力加速器の詳細説明

## IV-4 加速器シミュレータによる性能検証試験（その4）



各地点でのイオンビームパルス形状



イオンビームパルスは加速電極管#6中央部では、 $L=83.2\text{cm}$ まで広がっているが、各電極管の長さはこの広がりを考慮した上で、決定している。



## VI. 中性子発生用小型省電力加速器の詳細説明

### IV-4 加速器シミュレータによる性能検証試験（その5）

#### 《性能検証試験の結果》

- イオン源より、引出電流72mA、引出時間250nsにてイオンビームパルス  
を生成し加速した場合、ビーム最大半径は4.02cmで外壁に衝突すること  
なく、また加速制御も破綻することなくパルスがBeターゲットまで到達する  
ことを確認できた。
- 一つのイオンビームパルスに含まれる重陽子イオン個数は、 $1.13 \times 10^{11}$  個  
であり、電荷量は $1.8 \times 10^{-8}$  クーロンとなる。
- 加速器を繰返し周波数555kHzで運転した場合、平均加速電流10mA、す  
なわち10000  $\mu$ クーロン/秒となり、 $1.2 \times 10^{12}$  個/秒の中性子源強度を  
達成できる。

## VII. 仕様（その1）

### 中性子発生用小型省電力加速器の仕様

項目		仕様
中性子発生数（中性子源強度）		$1.2 \times 10^{12}$ 個/秒
発生中性子の平均エネルギー		約200keV
線形 加速器 主要諸元	加速粒子	重陽子（D <sup>+</sup> ）
	加速エネルギー	1.08MeV
	加速管本数	6
	加速器全長	11.3m
	ピーク電流	72mA
	パルス幅	250ns
	加速繰返周波数	555kHz
	販売価格（税抜き）	85百万円 ※

※加速器Sheath（加速器本体収納ケース）を含まない価格

## Ⅶ. 仕様（その2）

### 中性子発生用小型省電力加速器の補足仕様

#### 《重量》

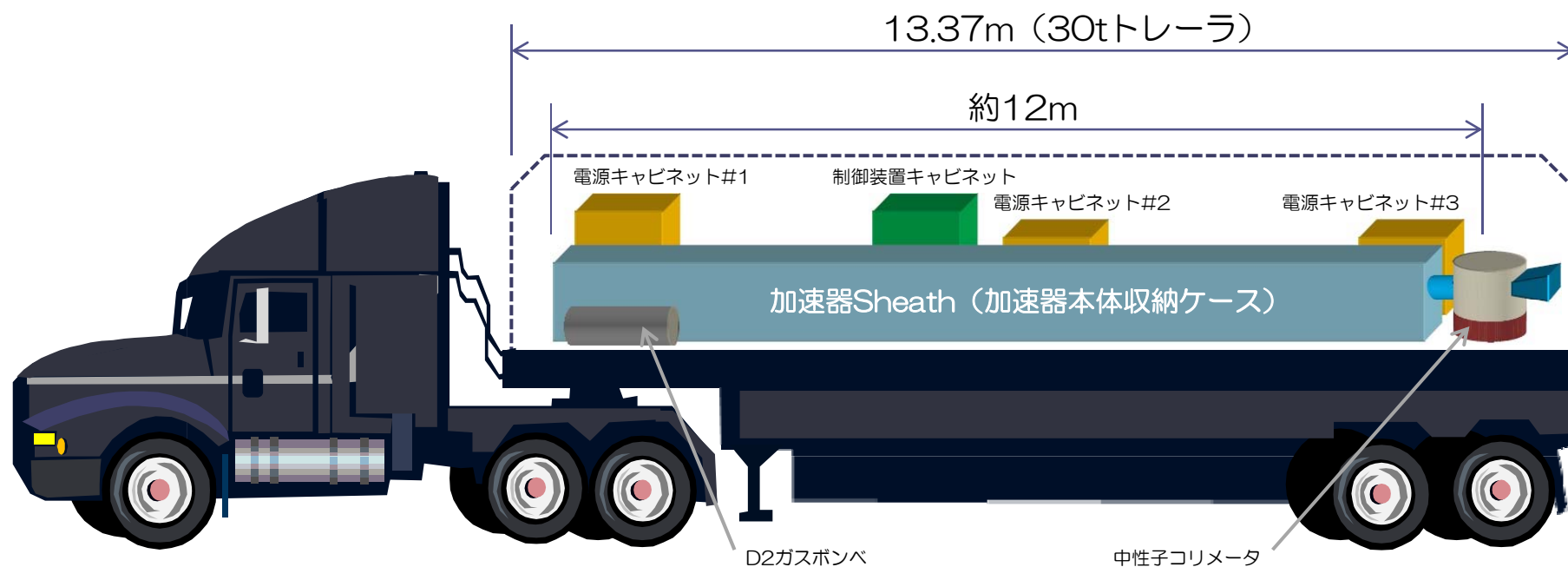
項目		重量 (kg)	総計
加速器本体	イオン源、各種電極管、Beターゲット、液冷装置、真空機器	250	850kg
電源	各種電源装置、キャビネット、電源ケーブル	300	
制御装置	スイッチングユニット（7個）	150	
	シーケンサ、操作／監視パネル、キャビネット	150	

#### 《消費電力》

項目		消費電力 (kW)	総計
加速器本体	・ 荷電粒子を加速するために消費する電力 ・ イオンビーム取出部のアインツェルレンズ消費電力	14.0	17.7kW
イオン源		1.0	
真空系	真空計／真空ポンプ消費電力	1.5	
制御装置		0.4	
液冷装置		0.8	

## Ⅶ. 仕様（その3）

### パッケージング



- 車載発電ユニット（エンジン駆動で最大発電出力25kW程度）により駆動可能なため、外部電源は不要。
- 電源余裕があるので、荷台全体の空調設備消費電力も車載ユニットにて賅える。
- 中性子コリメータを含めた重量が30 t 未満になるか否か確認が必要。

## VIII. 今後のスケジュール

### 1. 共同開発体制の構築

- 開発パートナーを見つける。

(応用技術に適した加速器仕様を明確化でき、効率的な製品開発が可能となる)

- 開発パートナーとの共同作業の中で、ターゲット案件を設定する。

(初号機製品仕様、製作スケジュール、製作体制の決定)



共同開発体制を構築した上で、製作着手する。

### 2. 要素技術の確認

- 高電圧直流電源の負荷特性

(パルス状負荷に対しても80%以上の変換効率が維持できることを確認する)

- 半導体スイッチの発熱量

(最大周波数1MHzでスイッチング連続動作をさせた時の素子温度上昇を確認する)

以上で報告を終了させていただきます。  
御清聴を感謝します。

2010年12月14日  
イーエムキューブ株式会社  
古久保 雄二