



超伝導BNCTシステムの検討

片山領 (KEK)、
加古永治 (KEK)、山口誠哉 (KEK)、道園真一郎 (KEK)、
梅森健成 (KEK)、近藤恭弘 (JAEA)

第17回日本加速器学会年会

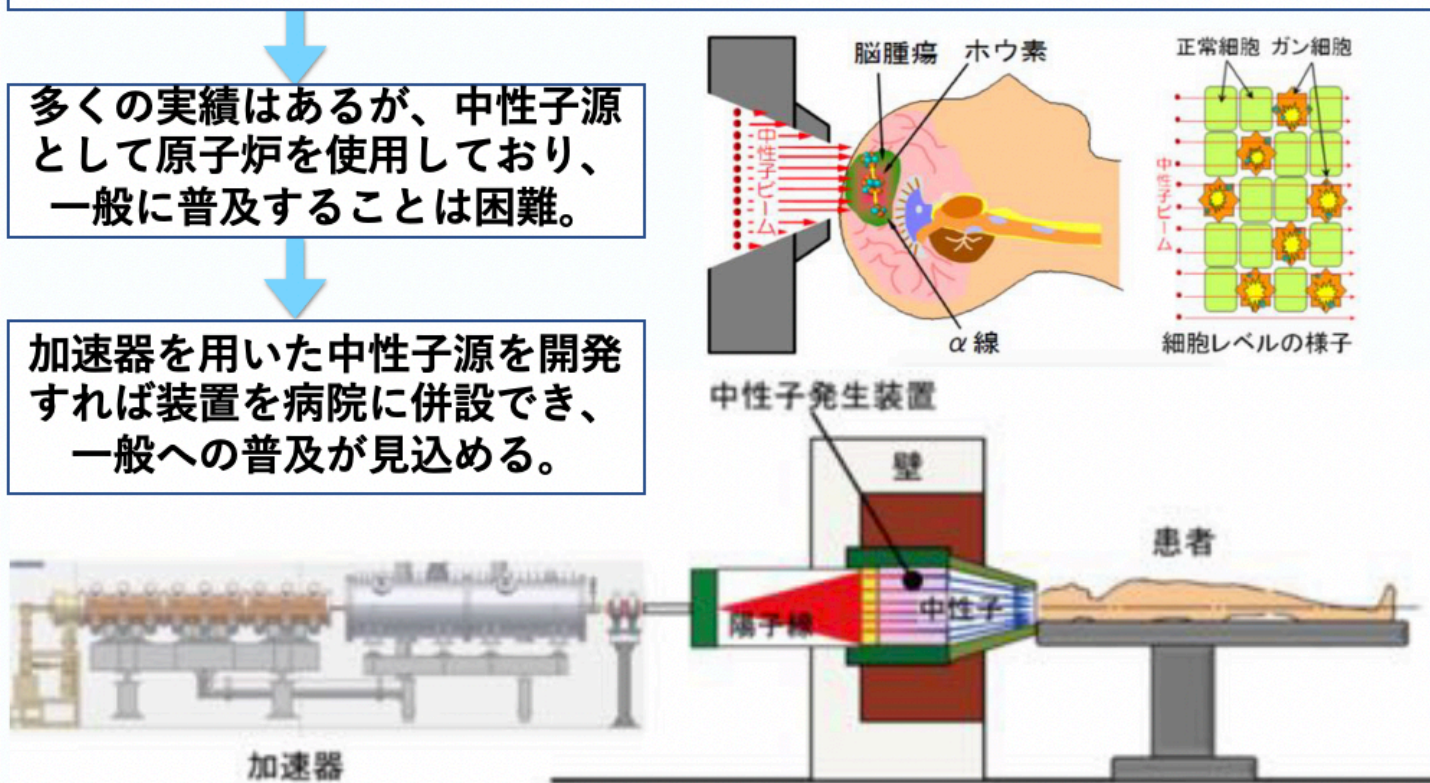


BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) の原理

癌細胞を選択的に破壊でき、X線、粒子線等の放射線治療で不可能な難治性がんに対して高い治療効果を示しており、身体的な負担が少ない治療法として注目されている。

多くの実績はあるが、中性子源として原子炉を使用しており、一般に普及することは困難。

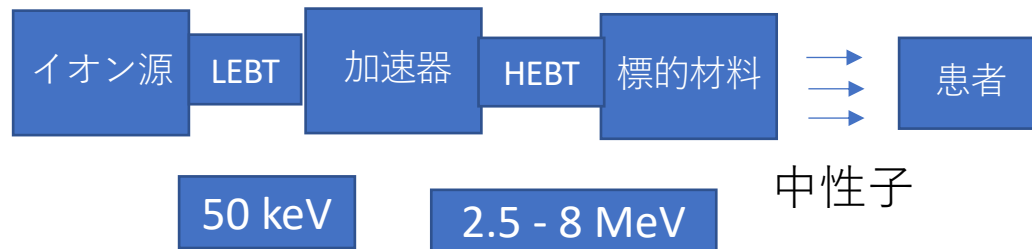
加速器を用いた中性子源を開発すれば装置を病院に併設でき、一般への普及が見込める。



[図引用元] 吉岡正和、"ホウ素中性子捕捉療法用小型加速器の開発と産学官連携"、産学官連携ジャーナル 2015年8月号

加速器型中性子源

- 例として、RF 線形加速器を用いた場合の典型的な BNCT 用の中性子源の構成を以下に示す



- 一般に、以下の点が課題である
 - 常伝導空洞の表面から数 **100 kW (CW)** の発熱がある
 - それに打ち勝てるだけの強力な RF 源が必要
 - 巨大な水冷システムの構築が必要
 - いずれも導入コストと運用コストの両面を押し上げる

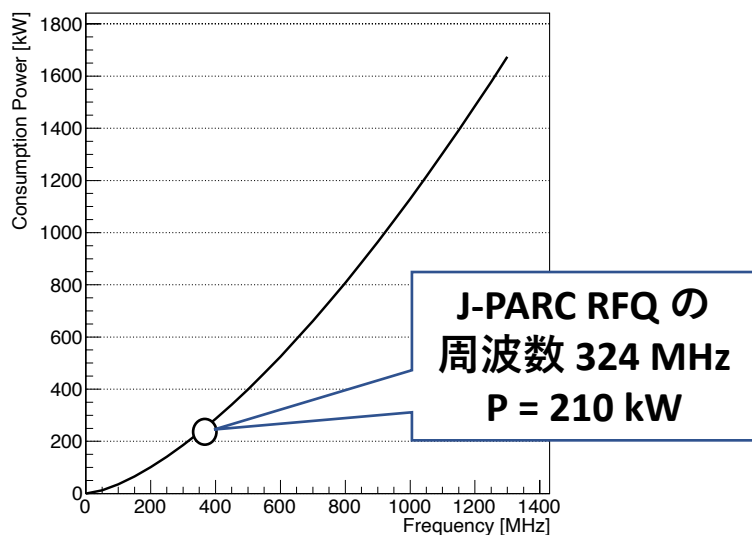
超伝導加速を利用すれば問題を解決できる可能性がある



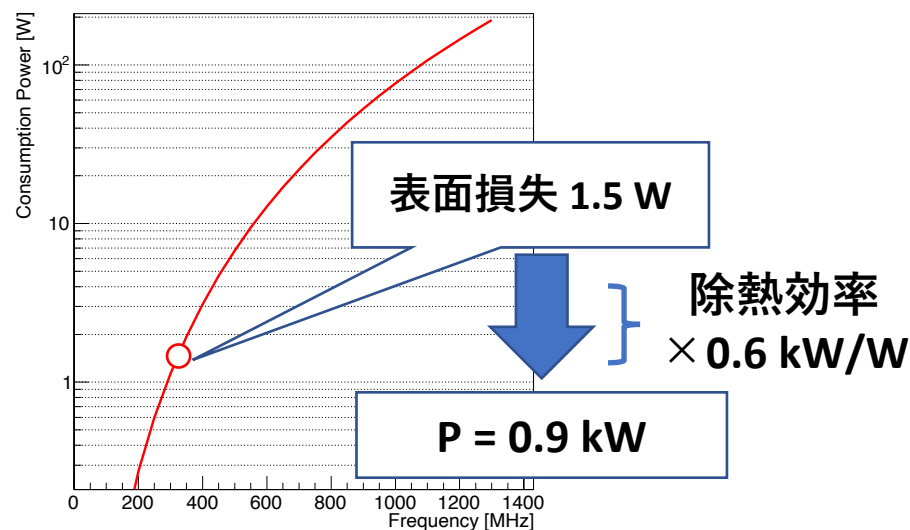
常伝導と超伝導空洞の消費電力の比較

- 銅製の常伝導 RFQ とニオブ製の超伝導 RFQ の消費電力の周波数依存性のプロットを以下に示す
 - 縦軸: RFQ の等価回路模型を用いて計算した消費電力
 - 周波数以外は J-PARC RFQ と同じ条件を仮定
(空洞長さ 3.1 m、電極間電圧 80 kV)

銅製の RFQ の消費電力 vs 周波数



左図を超伝導化した結果



4.2 K の He 冷凍機の除熱効率 0.6 kW/W を掛けても優位

超伝導 BNCT の解決すべき課題



- 一般に BNCT システムの超伝導化の実現可能性を担保するためには以下に示すような解決すべき課題がある

冷凍機負荷

- 超伝導加速を維持するためには Cryomodule 内の発熱量を 4.2 K ヘリウム冷凍機の最大除熱能力の範囲内に余力を持って収められなくてはならない

システムの省エネルギー化

- 超伝導化により AC 電力が従来のシステムと比べて改善されることを証明できなくてはならない

Cryomodule 内部の発熱量の評価が必要

超伝導 BNCT の解決すべき課題



- 一般に BNCT システムの超伝導化の実現可能性を担保するためには以下に示すような解決すべき課題がある

冷凍機負荷

- 超伝導加速を維持するためには Cryomodule 内の発熱量を 4.2 K ヘリウム冷凍機の最大除熱能力の範囲内に余力を持って収められなくてはならない

システムの省エネルギー化

- 超伝導化により AC 電力が従来のシステムと比べて改善されることを証明できなくてはならない

Cryomodule 内部の発熱量の評価が必要

ビーム衝突起因発熱量

高周波損失

Cryomodule 外からの熱侵入



本研究で想定する BNCT システムの構成

- 本研究では、まずは最も簡単な構成である RFQ のみで粒子を加速する BNCT システムに焦点を当て、実現可能性を検討した



- 治療に十分なだけの中性子を発生するために目標とする
ビーム強度は以下の通り

標的	粒子	エネルギー	電流	発生中性子数
Li	p	2.5 MeV	20 mA	国立がん研究センターの目標値と等価
Be	p	5 MeV	15 mA	i-BNCT の目標値と等価
Be	d	5 MeV	10 mA	同上

- 実際は LEBT で幾らかビームが失われるため、イオン源からの出力電流を 30 mA, 50 keV, 0.02 cm mrad としてシミュレーションを行った



Analysis Procedure in this study

BNCT の設計パラメータを指定

- ✓ Accelerated Particle (p or d)
- ✓ Beam Energy (2.5 or 5 MeV)
- ✓ Beam Current (30 mA)
- ✓ 標的材料 (Be or Li)

RFQGenを用いて RFQ を設計

- ✓ 共鳴周波数
- ✓ Shaper 出口での Energy
- ✓ Gentle Buncher 出口での Energy
- ✓ RFQ の最小半径
- ✓ 表面最大電界

LEBT + RFQ のビームシミュレーションを実行

ビーム衝突起因の発熱量を計算

高周波損失を計算
(by RFQ 等価回路)

- ✓ BCS 抵抗の評価
- ✓ 残留抵抗の評価

冷凍機の除熱能力の
上限値と比較

SC-BNCT の AC 消費
電力を計算

- ✓ 4.2 K He 冷凍機 (除熱能力100 W)
- ✓ RF 源効率
- ✓ 冷凍機効率
- ✓ 外部熱侵入量



Analysis Procedure in this study

BNCT の設計パラメータを指定

- ✓ Accelerated Particle (p or d)
- ✓ Beam Energy (2.5 or 5 MeV)
- ✓ Beam Current (30 mA)
- ✓ 標的材料 (Be or Li)

RFQGenを用いて RFQ を設計

空洞周波数	325 MHz (for p) 162.5 MHz (for d)
Shaper 出口でのエネルギー	55 keV
Gentle Buncher 出口でのエネルギー	0.5 MeV
RFQ の最小半径	0.32 (for p) 0.48 cm (for d)
表面最大電界	30-60 MV/m

LEBT + RFQ のビームシミュレーションを実行

ビーム衝突起因の発熱量を計算

高周波損失を計算
(by RFQ 等価回路)

- ✓ BCS 抵抗の評価
- ✓ 残留抵抗の評価

冷凍機の除熱能力の上限値と比較

SC-BNCT の AC 消費電力を計算

- ✓ 4.2 K He 冷凍機 (除熱能力100 W)
- ✓ RF 源効率
- ✓ 冷凍機効率
- ✓ 外部熱侵入量



Analysis Procedure in this study

BNCT の設計パラメータを指定

- ✓ Accelerated Particle (p or d)
- ✓ Beam Energy (2.5 or 5 MeV)
- ✓ Beam Current (30 mA)
- ✓ 標的材料 (Be or Li)

RFQGenを用いて RFQ を設計

空洞周波数	325 MHz (for p) 162.5 MHz (for d)
Shaper 出口でのエネルギー	55 keV
Gentle Buncher 出口でのエネルギー	0.5 MeV
RFQ の最小半径	0.32 (for p) 0.48 cm (for d)
表面最大電界	30-60 MV/m

LEBT + RFQ のビームシミュレーションを実行

ビーム衝突起因の発熱量を計算

高周波損失を計算
(by RFQ 等価回路)

RF 表面抵抗 (BCS)	Nb の BCS 抵抗の半径経験式を使用
RF 表面抵抗 (res)	325 MHz CH-DTL と同じ 43 nΩ を使用

冷凍機の除熱能力の上限値と比較

SC-BNCT の AC 消費電力を計算

- ✓ 4.2 K He 冷凍機 (除熱能力100 W)
- ✓ RF 源効率
- ✓ 冷凍機効率
- ✓ 外部熱侵入量



Analysis Procedure in this study

BNCT の設計パラメータを指定

RFQGenを用いて RFQ を設計

LEBT + RFQ のビームシミュレーションを実行

ビーム衝突起因の
発熱量を計算

高周波損失を計算
(by RFQ 等価回路)

冷凍機の除熱能力の
上限値と比較

SC-BNCT の AC 消費
電力を計算

- ✓ Accelerated Particle (p or d)
- ✓ Beam Energy (2.5 or 5 MeV)
- ✓ Beam Current (30 mA)
- ✓ 標的材料 (Be or Li)

空洞周波数	325 MHz (for p) 162.5 MHz (for d)
Shaper 出口での エネルギー	55 keV
Gentle Buncher 出口 でのエネルギー	0.5 MeV
RFQ の最小半径	0.32 (for p) 0.48 cm (for d)
表面最大電界	30-60 MV/m

RF 表面抵抗 (BCS)	Nb の BCS 抵抗の 半経験式を使用
RF 表面抵抗 (res)	325 MHz CH-DTL と同 じ 43 nΩ を使用

✓ 冷凍機効率	0.6 kW/W (表面発熱)
✓ 冷凍機効率	1 kW/W (外部熱侵入)
✓ RF 源の効率	50 %
✓ 外部熱侵入	20 W



Analysis Procedure in this study

BNCT の設計パラメータを指定

RFQGenを用いて RFQ を設計

LEBT + RFQ のビームシミュレーションを実行

ビーム衝突起因の
発熱量を計算

高周波損失を計算
(by RFQ 等価回路)

冷凍機の除熱能力の
上限値と比較

SC-BNCT の AC 消費
電力を計算

- ✓ Accelerated Particle (p or d)
- ✓ Beam Energy (2.5 or 5 MeV)
- ✓ Beam Current (30 mA)
- ✓ 標的材料 (Be or Li)

空洞周波数	325 MHz (for p) 162.5 MHz (for d)
Shaper 出口での エネルギー	55 keV
Gentle Buncher 出口 でのエネルギー	0.5 MeV
RFQ の最小半径	0.32 (for p) 0.48 cm (for d)
表面最大電界	30-60 MV/m

RF 表面抵抗 (BCS)	Nb の BCS 抵抗の 半経験式を使用
RF 表面抵抗 (res)	325 MHz CH-DTL と同 じ 43 nΩ を使用

✓ 冷凍機効率	0.6 kW/W (表面発熱)
✓ 冷凍機効率	1 kW/W (外部熱侵入)
✓ RF 源の効率	50 %
✓ 外部熱侵入	20 W

LEBT の軌道シミュレーション結果



ビーム電流 30 mA, 50 keV, 0.02 cm mrad と
以下の LEBT を仮定したシミュレーションを行った

For Proton LEBT

Element	Parameter
Drift	5.2 cm
Bending Magnet	曲率半径: 3.23 cm (1 T) 曲げ角: 2.5 deg
orifice	孔: ϕ 3 cm
Drift	6.1 cm
orifice	孔: ϕ 1.3 cm
Solenoid	磁場: 0.85 T 幅: 5 cm
Drift	36 cm
Solenoid	磁場: 0.85 T 幅: 5cm
orifice	孔: ϕ 1.0 cm
Drift	8.4 cm

透過率: 73.6 %

For Deuteron LEBT

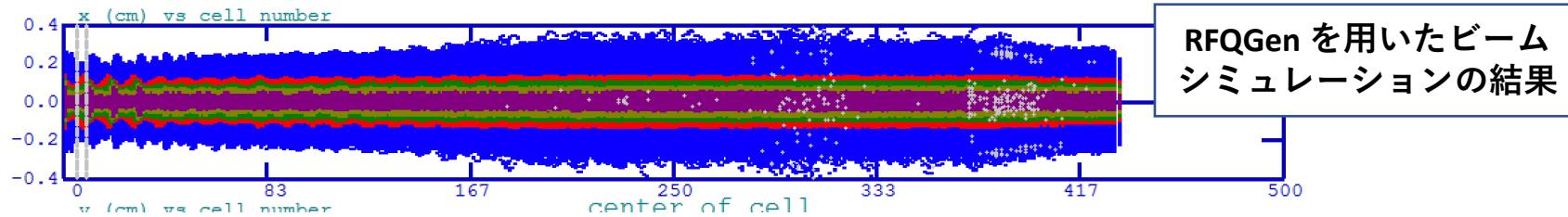
Element	Parameter
Drift	5.1 cm
Bending Magnet	曲率半径: 4.57 cm (1 T) 曲げ角: 2.5 deg
Drift	7.0 cm
Solenoid	磁場: 0.85 T 幅: 5 cm
Drift	29 cm
Solenoid	磁場: 0.85 T 幅: 5cm
orifice	孔: ϕ 2.5 cm
Drift	32 cm

透過率: 44.6 %




RFQ の軌道シミュレーション結果

続いて RFQ のシミュレーションを行った



\Ep	30 MV/m	35 MV/m	40 MV/m	45 MV/m	50 MV/m	55 MV/m	LEBT 透過率	Avg current
P 2.5 MeV		99.6 %	99.8 %	99.9 %	99.9 %	99.9 %	73.6%	22 mA
p 5 MeV		99.6 %	99.8 %	99.9 %	99.9 %	99.9 %	73.6%	22 mA
d 5 MeV	99.7 %	99.8 %	99.8 %	99.8 %	99.8 %		44.6%	13 mA

 ビーム透過率

 Avg Current

いずれもビーム電流の目標値をクリアしている



Analysis Procedure in this study

BNCT の設計パラメータを指定

RFQGenを用いて RFQ を設計

LEBT + RFQ のビームシミュレーションを実行

ビーム衝突起因の発熱量を計算

高周波損失を計算
(by RFQ 等価回路)

冷凍機の除熱能力の上限値と比較

SC-BNCT の AC 消費電力を計算

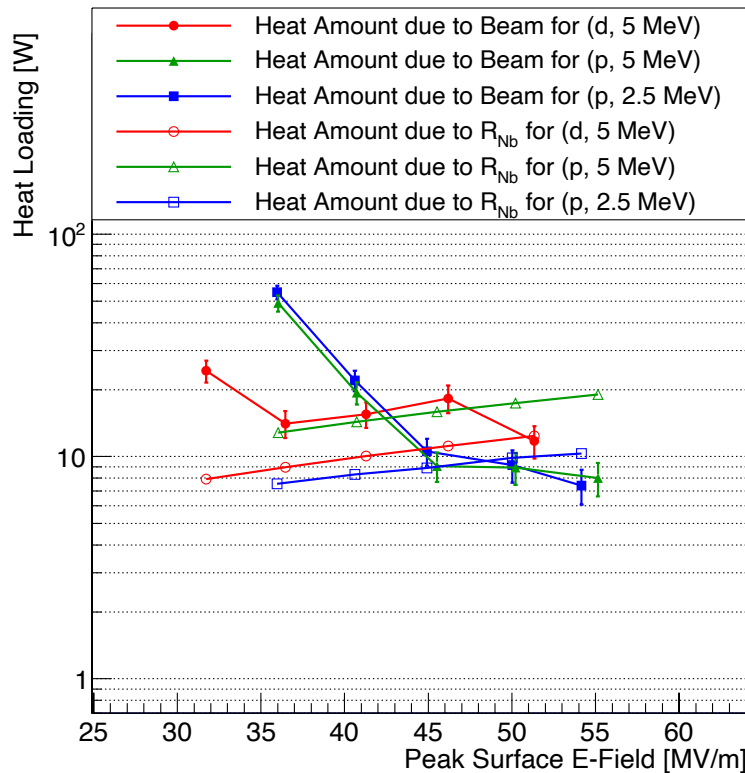
- ✓ Accelerated Particle (p or d)
- ✓ Beam Energy (2.5 or 5 MeV)
- ✓ Beam Current (30 mA)
- ✓ 標的材料 (Be or Li)

空洞周波数	325 MHz (for p) 162.5 MHz (for d)
Shaper 出口でのエネルギー	55 keV
Gentle Buncher 出口でのエネルギー	0.5 MeV
RFQ の最小半径	0.32 (for p) 0.48 cm (for d)
表面最大電界	30-60 MV/m

RF 表面抵抗 (BCS)	Nb の BCS 抵抗の半経験式を使用
RF 表面抵抗 (res)	325 MHz CH-DTL と同じ 43 nΩ を使用

冷凍機効率	0.6 kW/W (表面発熱)
冷凍機効率	1 kW/W (外部熱侵入)
RF 源の効率	50 %
外部熱侵入	20 W

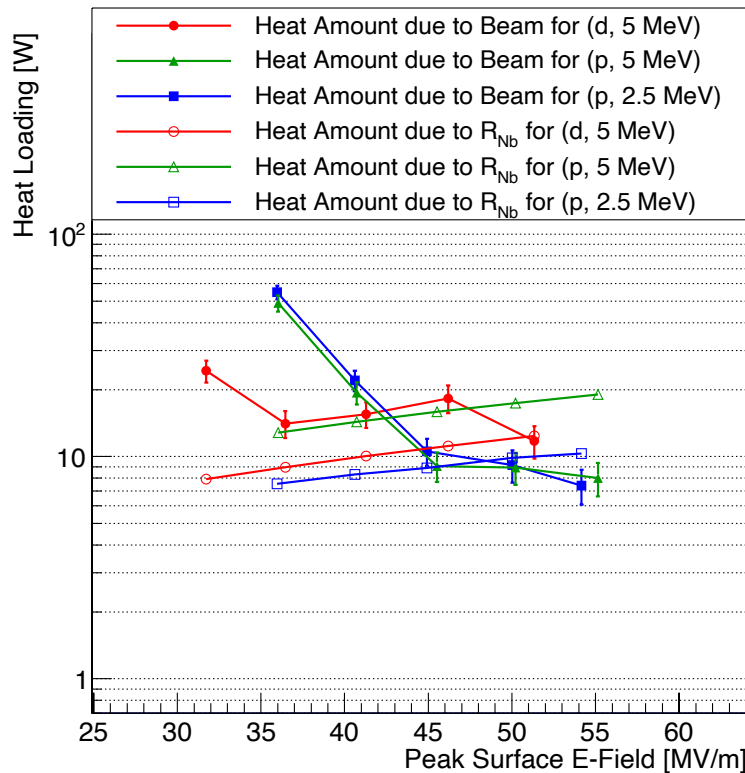
表面発熱量の評価



- 表面発熱 vs 最大表面電界 E_p (左図)
 - 横軸 E_p , 縦軸が Q_{col}
 - 赤: deuteron 5 MeV、緑: proton 5 MeV、青: proton 2.5 MeV
- 色付きの点がビーム衝突発熱量、白抜き点が高周波損失を表す
- 発熱量の合計を以下の表にまとめる
- **4.2 K He 冷凍機の最大除熱能力 100 W**
- **外部熱侵入 ~ 20 W**

E_p	30 MV/m	35 MV/m	40 MV/m	45 MV/m	50 MV/m	55 MV/m
p 2.5 MeV		62 W	30 W	19 W	19 W	18 W
p 5 MeV		62 W	34 W	25 W	26 W	27 W
d 5 MeV	32 W	22 W	25 W	28 W	24 W	

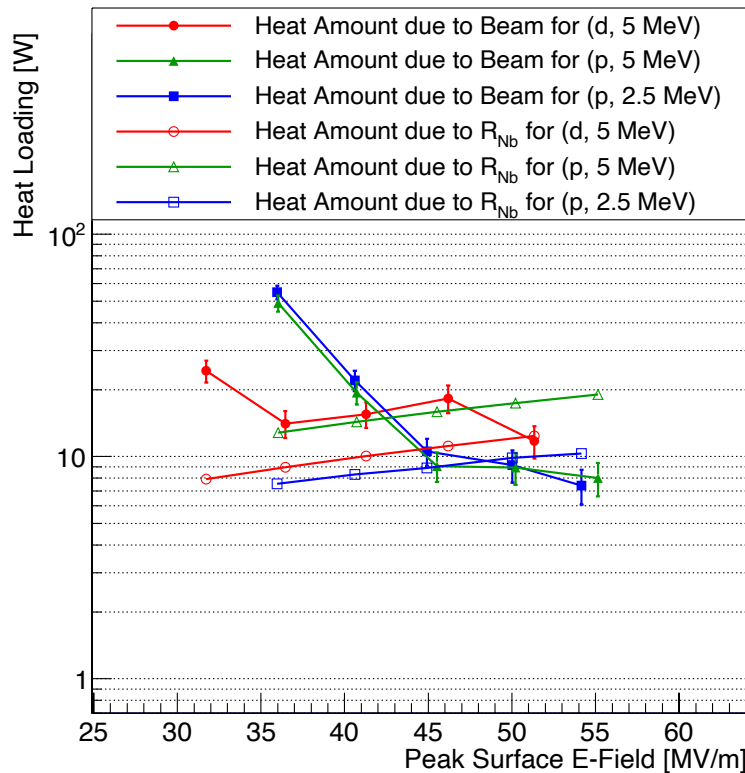
表面発熱量の評価



- 表面発熱 vs 最大表面電界 E_p (左図)
 - 横軸 E_p , 縦軸が Q_{col}
 - 赤: deuteron 5 MeV、緑: proton 5 MeV、青: proton 2.5 MeV
- 色付きの点がビーム衝突発熱量、白抜きのが高周波損失を表す
- 発熱量の合計を以下の表にまとめる
- **4.2 K He 冷凍機の最大除熱能力 100 W**
- **外部熱侵入 ~ 20 W**

E_p	30 MV/m	35 MV/m	40 MV/m	45 MV/m	50 MV/m	55 MV/m
p 2.5 MeV	Exclude		30 W	19 W	19 W	18 W
p 5 MeV			34 W	25 W	26 W	27 W
d 5 MeV	32 W	22 W	25 W	28 W	24 W	

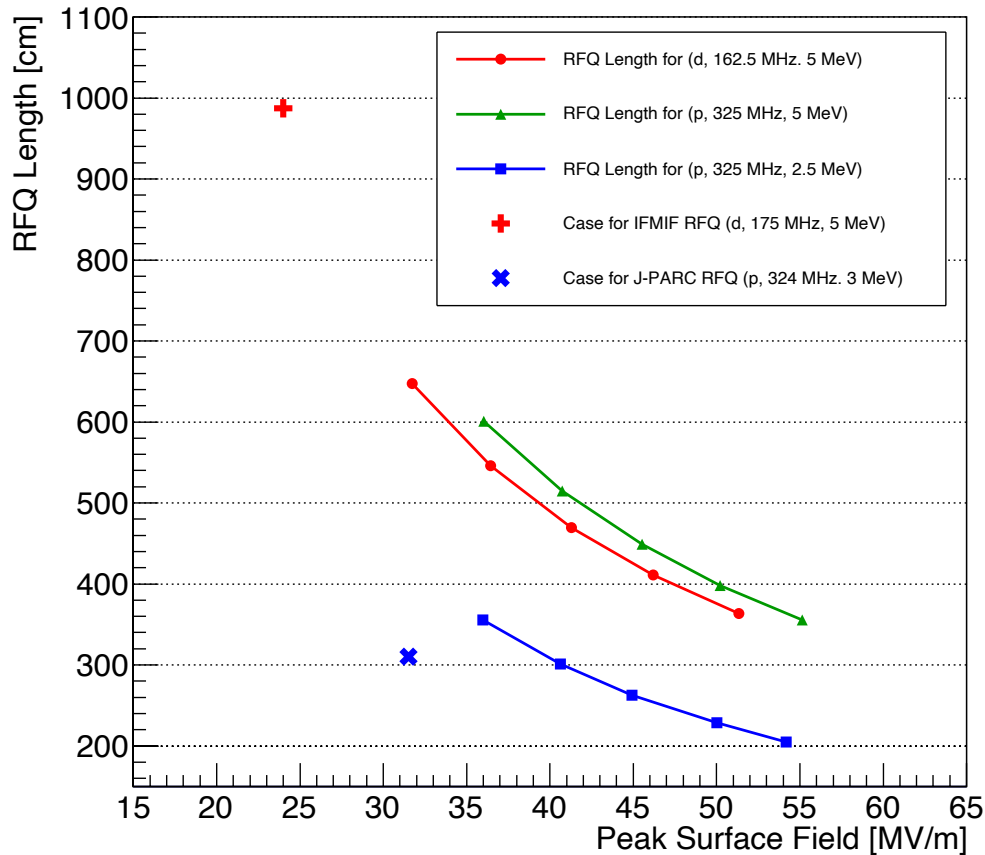
表面発熱量の評価



- 表面発熱 vs 最大表面電界 E_p (左図)
 - 横軸 E_p , 縦軸が Q_{col}
 - 赤: deuteron 5 MeV、緑: proton 5 MeV、青: proton 2.5 MeV
- 色付きの点がビーム衝突発熱量、白抜きのが高周波損失を表す
- 発熱量の合計を以下の表にまとめる
- **4.2 K He 冷凍機の最大除熱能力 100 W**
- **外部熱侵入 ~ 20 W**

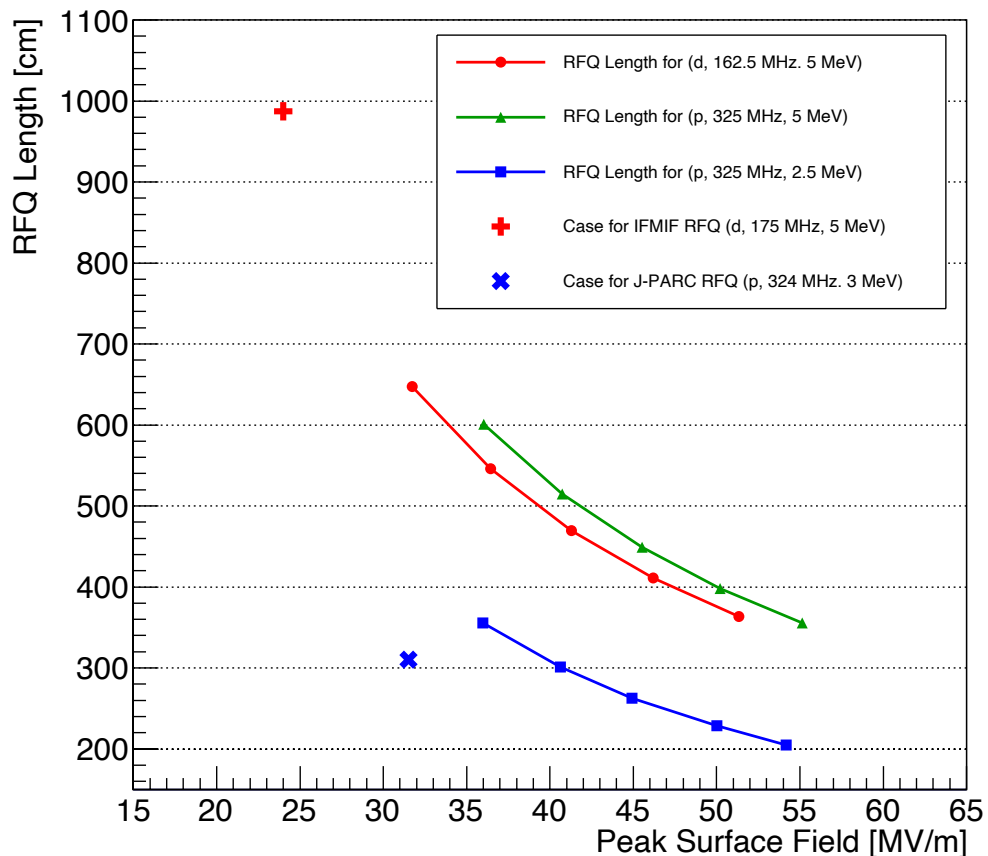
$E_p > 30$ MV/m (for deuteron) and $E_p > 40$ MV/m (for proton) で Cryomodule 内部の発熱量を 4.2 K ヘリウム冷凍機の最大除熱能力の範囲内に余力を持って収められることを確認

RFQ 長の比較



- 本研究で得た RFQ 長の比較を左図に示す
 - 横軸 E_p , 縦軸が RFQ 長
 - 赤: deuteron 5 MeV、緑: proton 5 MeV、青: proton 2.5 MeV
- 参考のため IFMIF と J-PARC の RFQ の長さもプロットしている
- Proton は $E_p > 40$ MV/m で加速器長を既存の RFQ より短縮できる

RFQ 長の比較



- 本研究で得た RFQ 長の比較を左図に示す
 - 横軸 E_p , 縦軸が RFQ 長
 - 赤: deuteron 5 MeV、緑: proton 5 MeV、青: proton 2.5 MeV
- 参考のため IFMIF と J-PARC の RFQ の長さもプロットしている
- Proton は $E_p > 40$ MV/m で加速器長を既存の RFQ より短縮できる

$E_p > 30$ MV/m (for deuteron) and $E_p > 40$ MV/m (for proton) で Deuteron/Proton 加速ともに **RFQ 長を既存のそれの同等以下に短縮** できることを確認



Analysis Procedure in this study

BNCT の設計パラメータを指定

- ✓ Accelerated Particle (p or d)
- ✓ Beam Energy (2.5 or 5 MeV)
- ✓ Beam Current (30 mA)
- ✓ 標的材料 (Be or Li)

RFQGenを用いて RFQ を設計

空洞周波数	325 MHz (for p) 162.5 MHz (for d)
Shaper 出口でのエネルギー	55 keV
Gentle Buncher 出口でのエネルギー	0.5 MeV
RFQ の最小半径	0.32 (for p) 0.48 cm (for d)
表面最大電界	30-60 MV/m

LEBT + RFQ のビームシミュレーションを実行

ビーム衝突起因の発熱量を計算

高周波損失を計算
(by RFQ 等価回路)

RF 表面抵抗 (BCS)	Nb の BCS 抵抗の半径経験式を使用
RF 表面抵抗 (res)	325 MHz CH-DTL と同じ 43 nΩ を使用

冷凍機の除熱能力の上限値と比較

SC-BNCT の AC 消費電力を計算

- ✓ 冷凍機効率 0.6 kW/W (表面発熱)
- ✓ 冷凍機効率 1 kW/W (外部熱侵入)
- ✓ RF 源の効率 50 %
- ✓ 外部熱侵入 20 W

BNCT システムの運用電力の比較



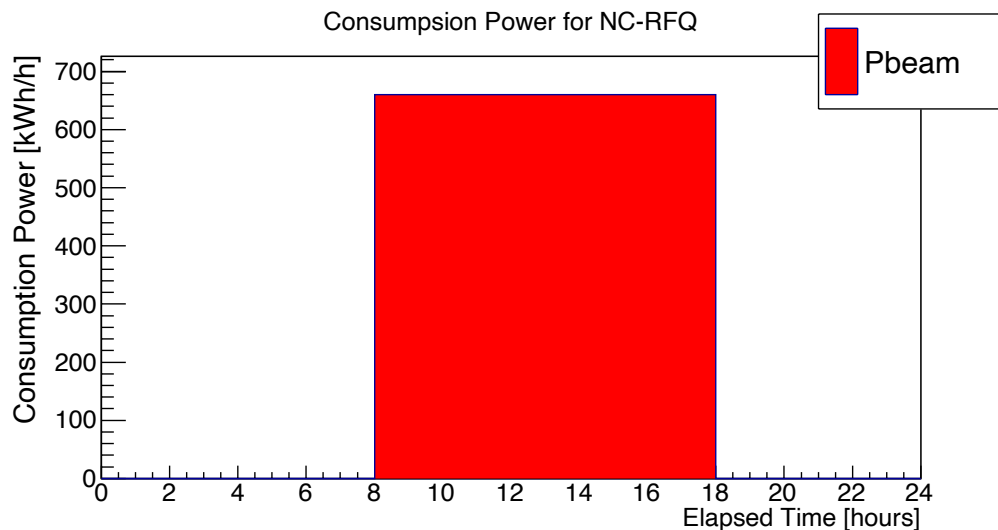
従来の BNCT と SC-BNCT システムとの運用電力の比較を行う

- 以下、Proton (20 mA, 2.5 MeV) を Lithium に照射して中性子を得るシステムを想定する
 - 国立がん研究センターで採用されているシステムを想定
 - 330 kW のクライストロンを使用
- システムの稼働時間を $T = 10 \text{ hours/day}$ とする
 - 朝 8:00 – 夜 18:00 の運転を想定
- AC 消費電力の評価式:

常伝導の場合は寄与が 0

$$W_s = \frac{\overbrace{P_{n,in}}^{\text{RF 源出力}}}{\underbrace{\epsilon_{RF}}_{\text{RF 源の電力効率}}} T + \underbrace{Q_{surf}}_{\text{表面発熱量}} \underbrace{\epsilon_{surf}}_{\text{冷凍機効率 (表面発熱)}} T + \underbrace{Q_{ext}}_{\text{外部熱侵入量}} \underbrace{\epsilon_{ext}}_{\text{冷凍機効率 (外部熱侵入)}} 24$$

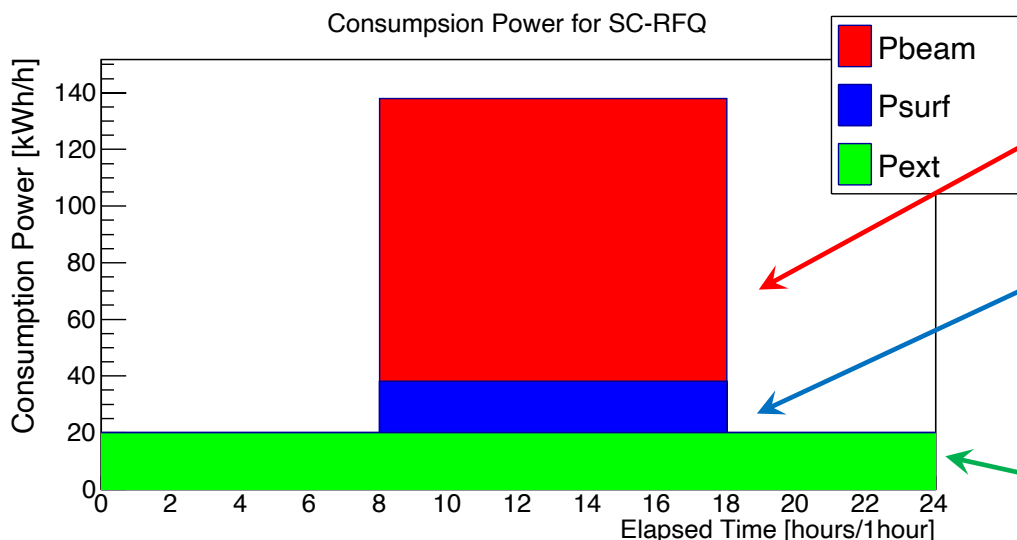
常伝導 BNCT システムの運用電力



想定したBNCTシステム	国立がん研究センター
ビーム強度	20 mA, 2.5 MeV
RF 源の電力効率	50 %
RF 源の出力	330 kW Klystron
運用時間	8:00-18:00 (10 h)


$$\text{運用電力} = \text{RF 電力} = 330 \text{ kW} \times 2 \times 10 \text{ h} = 6.6 \text{ MWh}$$

超伝導 BNCT システムの運用電力



BNCT システム	SC-BNCT
ビーム強度	20 mA, 2.5 MeV
RF 源の電力効率	50 %
Beam Loading	50 kW
表面発熱量 Q_{surf}	30 W
冷凍機効率	0.6 kW/W
外部熱侵入量 Q_{ext}	20 W
冷凍機効率	1 kW/W
運用時間	8:00-18:00 (10 h)

$$\text{RF 電力} = 50 \text{ kW} \times 2 \times 10 \text{ h} = 1 \text{ MWh}$$

$$\text{冷凍機電力1} = 30 \text{ W} \times 0.6 \text{ kW/W} \times 10 \text{ h} = 180 \text{ kWh}$$

$$\text{冷凍機電力2} = 20 \text{ W} \times 1 \text{ kW/W} \times 24 \text{ h} = 480 \text{ kWh}$$



BNCT システムの運用電力の比較

- 改めて結果を再掲すると以下の通り
 - 常伝導 BNCT の運用電力 $W_n = 6600$ [kWh]
 - 超伝導 BNCT の運用電力 $W_s = 1660$ [kWh]
- 両者の電力比: $W_n/W_s = 3.98 \sim 4$



超伝導化により電力比を 4 倍改善できることがわかった

Summary



冷凍機負荷

- RFQGen により > 99.5 % のビーム透過率の RFQ を設計
- シミュレーションを用いて表面発熱量 vs を最大表面電界の関係を数値的に見積もった
- Cryomodule 内部の発熱量を 4.2 K ヘリウム冷凍機の最大除熱能力の範囲内に余力を持って収められることを確認

消費電力の評価

- RF電力と冷凍機電力を評価し、既存の BNCT システムと電力を比較した
- 超伝導化によりAC電力を4倍改善できる見積もりを得た

加速器システムのサイズ

- RFQ の設計で得られる加速器長さを既存のシステムと比較
- Deuteron/Proton 加速ともに RFQ 長を既存のそれの同等以下に短縮できることを確認

- 以上を総合して、最大表面電界として >30 MV/m (for deuteron) と >40 MV/m (for proton) を達成できれば、BNCT の超伝導化によって従来より低消費電力でコンパクトなシステムを構成でき、実現可能性を保証できることを示すことができた



ご清聴ありがとうございました