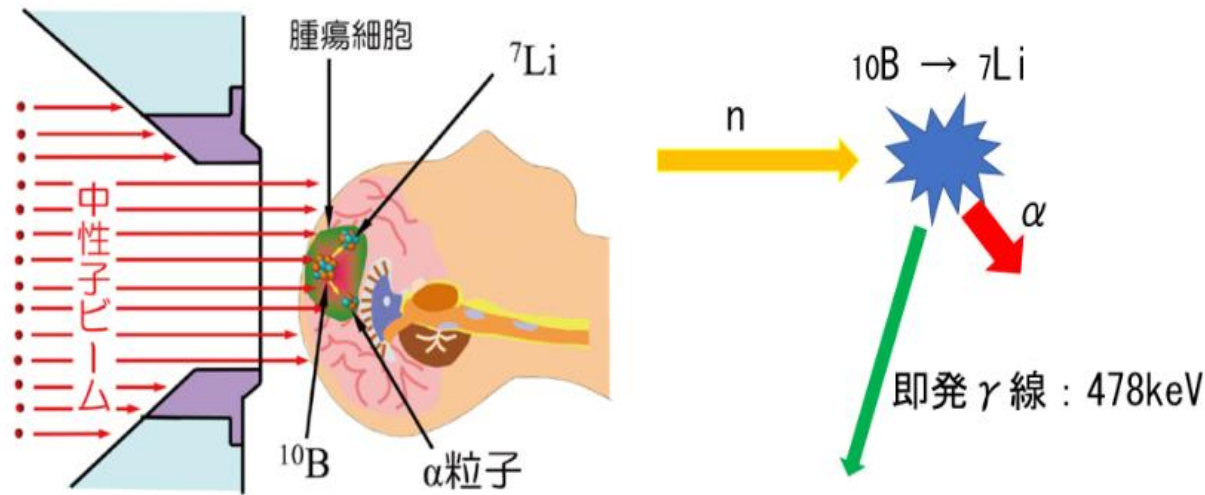


**究極のがん治療装置として期待される  
電子線加速器による次世代BNCTの事業化**

# 究極のがん治療装置として期待されるBNCT

- ・ホウ素薬剤を、注射により腫瘍細胞にホウ素薬剤を集積させ、そこに中性子を照射します。
- ・病巣内部に限局的な核反応を起こし、発生した $\alpha$ 線が従来の放射線療法と比べ、はるかに大きな線量を腫瘍細胞のみに照射することができます。
- ・これまで治療不可能であった病巣にも周囲に損傷を与えることなく、治療ができる大きな可能性を持った治療法です。



## BNCT の主な適応がん種

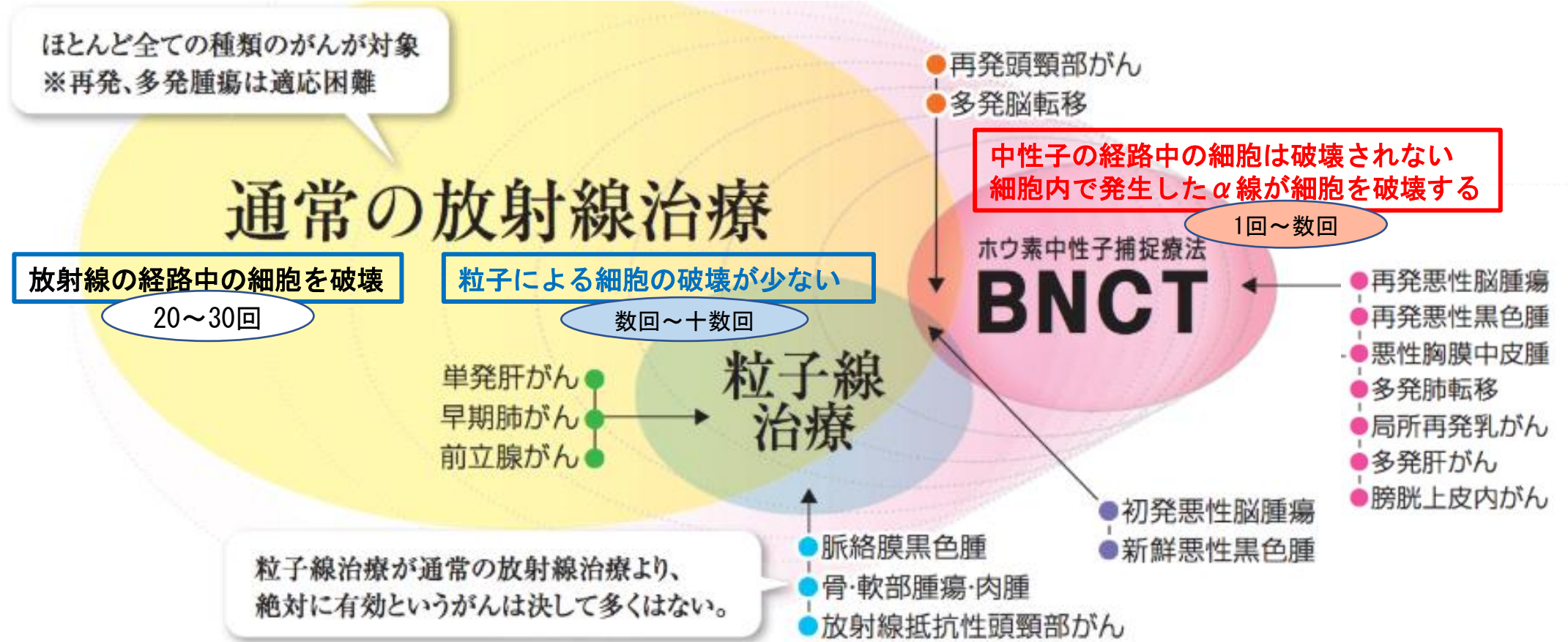
手術が出来ない部位の癌に有効

- ・ 悪性脳腫
- ・ 頭頸（けい）部がん など

即発 $\gamma$ 線を観測することにより、  
①腫瘍の位置や大きさの特定  
②ホウ素含有薬剤の開発  
③治療の効果の評価  
が可能になる。

2次元、3次元の解析が可能な  
ガンマー線可視化装置が必要  
 $\gamma$ カメラ・ $\gamma$ -CTに期待

# BNCT治療法の有用性



粒子線治療：ほとんどの部位が適応可能であるが、がん組織以外の組織も同様に損傷するために、絶対的有用な方法ではない。

BNCT：現在は頭頸部癌のみ保険承認されており、他の部位（肺癌、中皮腫、黒色腫、乳癌、肝癌、膀胱癌、多発脳転移等）は治験の実施中。保険適応拡大に向けた治験が求められています。

BNCT治療はその有用性から多くの病院でBNCTの導入が検討され、「病院で行う治療」としては世界から注目され、特に医療環境のレベルが低いアジア地域の数多くの医療機関が設置を期待している医療装置です。

## 本提案のミッション

従来のBNCT建設費：約50億円以上：これでは社会が受け入れない高額医療施設で有ります。本計画では先端技術力を駆使して、実用的価格内での次世代BNCT治療器を開発します。

原子炉で行う治療 ⇒ 病院で行う治療

陽子線で中性子発生 ⇒ 電子線で中性子発生

質量比 陽子：電子=1:1/1840

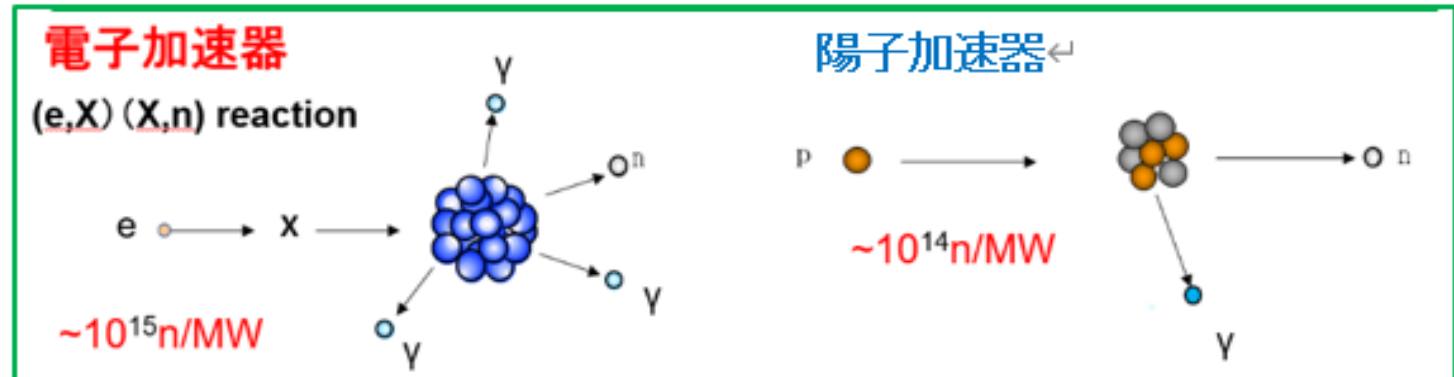
BNCT建設費：約50億円 ⇒ 約10億円で実現

# 電子線加速による中性子発生

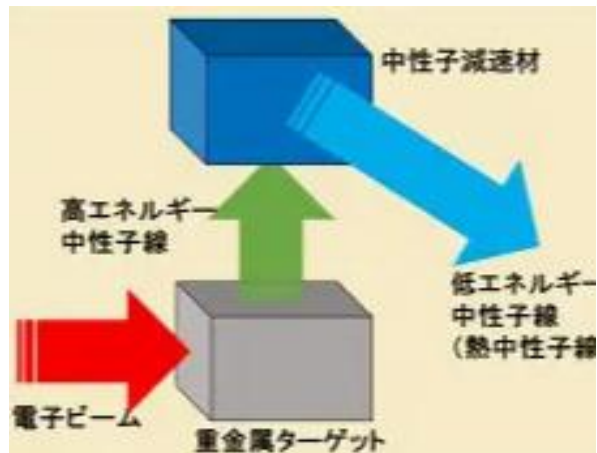
中性子は下記2段階の過程を経て発生される。

- ①電子を加速させて、ターゲット (W) に衝突させる。この時、電子のエネルギーは制動放射によりX線に変換される。エネルギーが大きいため、 $\gamma$ 線と同様の電磁波が放出される。
- ②同じターゲットのW内で ( $\gamma$ , n) 光核反応により中性子を発生
- ③ BNCT用に必要な熱外中性子はモデラーにより減速させる。

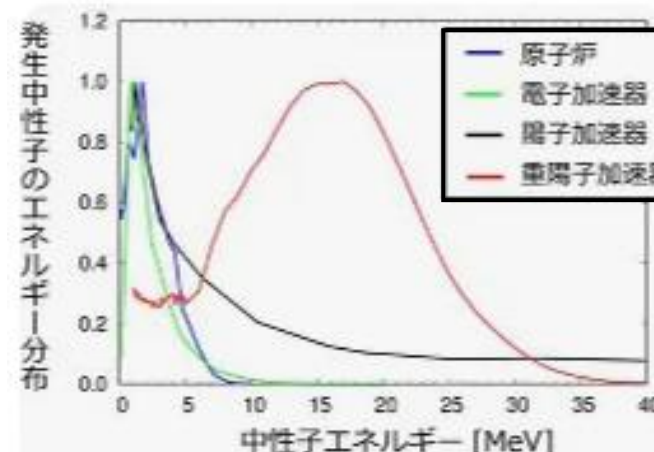
電子加速と陽子加速の発生機構の相違



電子ビーム⇒熱外中性子



中性子の発生法による中性子スペクトルの比較  
BNCT用には電子加速器(一)が効果的

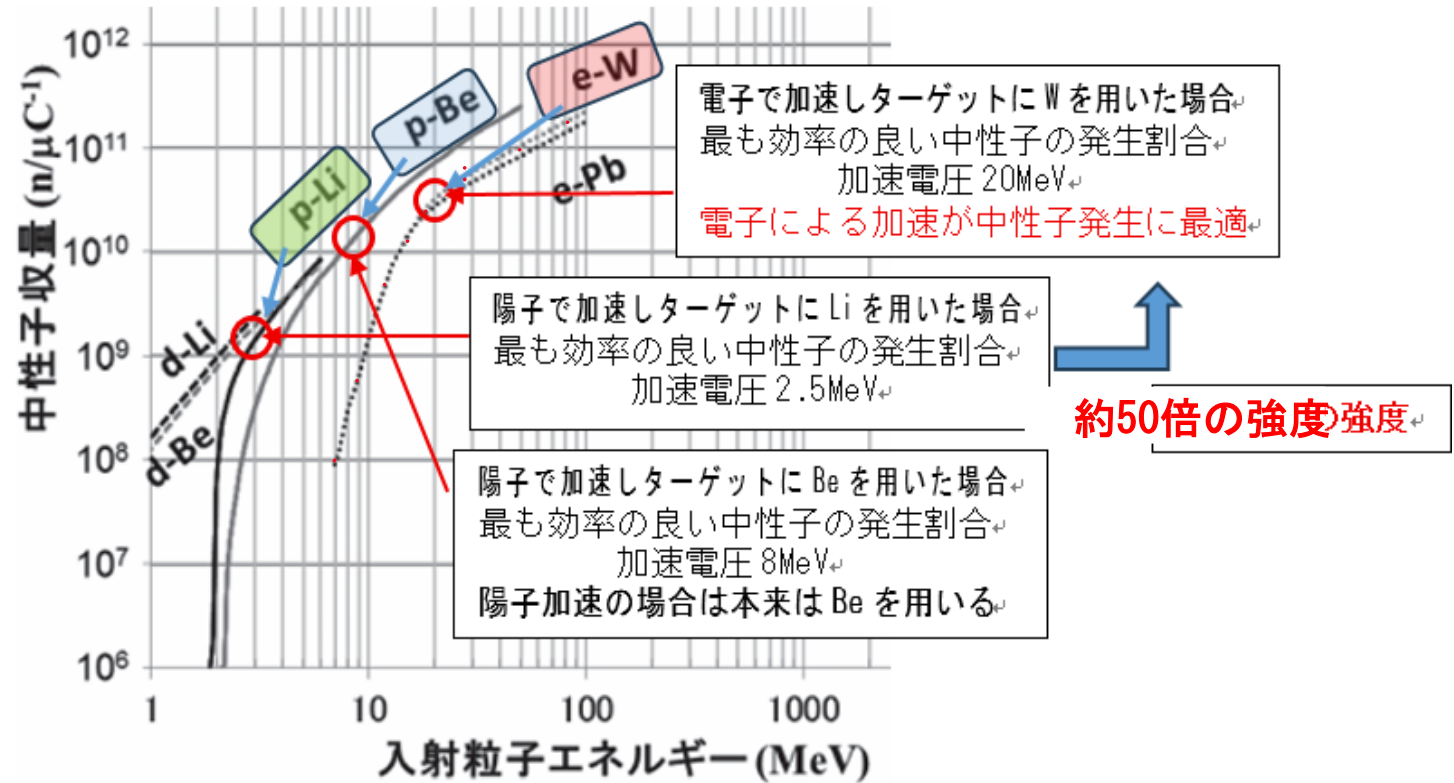


# 電子線加速のメリット

中性子発生加速粒子に軽い電子を用いることを特徴：BNCTに用いる中性子の発し効率が最も高い

国内で駆動している2機のBNCTはいずれも陽子加速で、かつ加速電圧は30MeVと過大である。  
 →20MeVが最適  
 →不要な速中性子が増大する。

電子線加速ではBNCTに有効な中性子が約50倍得られると考えられる。



	加速器	加速粒子	発生機構	発生中性子	メリット	デメリット
従来法	サイクロトロン 30MeV、1mA	陽子	Li (p, n) B(n, α)	速中性	使用実績がある	装置が大型になる 周辺の物質が放射化される 熱外中性子の転換が困難
本提案	マイクロトロン 20MeV、1mA	電子	W (X, n) B(n, α)	熱中性子	装置の小型化が可能 遮蔽体構造が容易 放射化の確率が小さい	新規開発課題有

# 陽子線加速BNCTと電子線加速BNCTの比較

比較項目	陽子線加速器型BNCT	電子加速器型BNCT
中性子生成原理	陽子+軽元素標的による (p, n) 反応	電子 → $\gamma$ 線 → ( $\gamma$ , n) 反応
加速器構成	高電圧・高磁場、ビーム輸送系が複雑	構成が簡素
装置規模	大型化	小型化・モジュール化が可能
初期導入コスト	高い (50億円規模)	低減余地が大きい (8億円程度)
運用・保守	専門技術者常駐が必要	既存電子加速器技術で対応可能
病院内設置	制約が多い	中小規模病院への導入可能性
技術成熟度	実用段階	研究開発・高度化余地が大きい
産業波及性	特定企業依存	国産技術・多企業参入が可能
海外展開	高コストが障壁	新興国・アジア市場に適合

なぜ今、電子加速器型BNCTなのか

①短期間・低侵襲で治療可能なBNCTは、こうした社会構造の変化に適合する治療法であり、特に設備負担を抑えつつ導入可能な電子加速器型BNCTは、今後の地域医療・中核病院において現実的な選択肢となる。

②電子加速器型BNCTは装置規模・コスト・設置自由度の面で優位性を有し、次世代の標準BNCT候補として検討すべき段階に到達している。

高齢化・低侵襲医療ニーズ

普及型医療への転換点

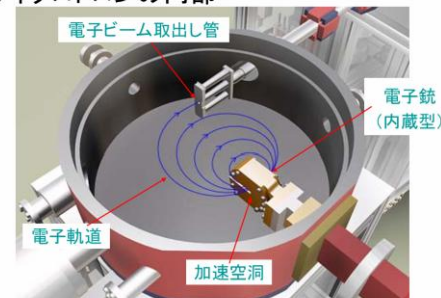
電子加速器技術の成熟

電子加速器によるBNCTの実現

## 実用化開発等の内容

本事業では、電子線方式による次世代BNCT照射装置の実用化開発を行う。装置は「加速室」と「照射・治療室」から構成され、電子加速から中性子生成、照射、リアルタイム監視までを一体化したシステムとして開発する。

マイクロトロン内部



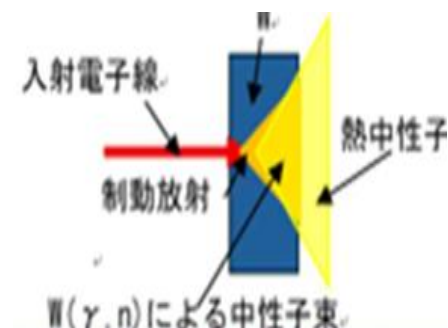
電子は一樣磁場中を周回し、加速空洞で加速、所定のエネルギーに達すると取り出される。

### ① 電子線加速器の開発

加速粒子に従来の陽子ではなく電子を用いる。電子は質量が小さく加速効率がいため、装置の小型化と高エネルギーX線の安定発生が可能である。電子線をターゲットに照射し ( $\gamma, n$ ) 核反応を起こすことで中性子を生成する。遮蔽体構造を簡素化でき、装置全体を従来型の約1/5規模へ小型化することを目指す。

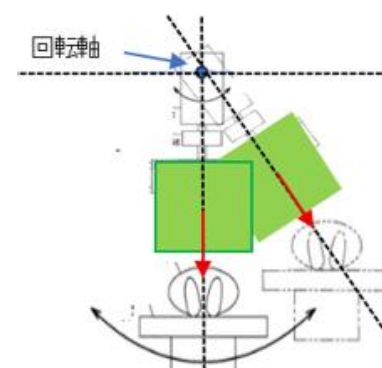
### ② 中性子減速・ビーム整形機構の開発

生成された中性子をBNCTに有効なエネルギー領域 (0.5eV~40keVの熱外中性子) へ効率的に減速する減速材およびビーム整形機構を開発する。



### ③ 医療用照射機構 (ガントリー) の開発

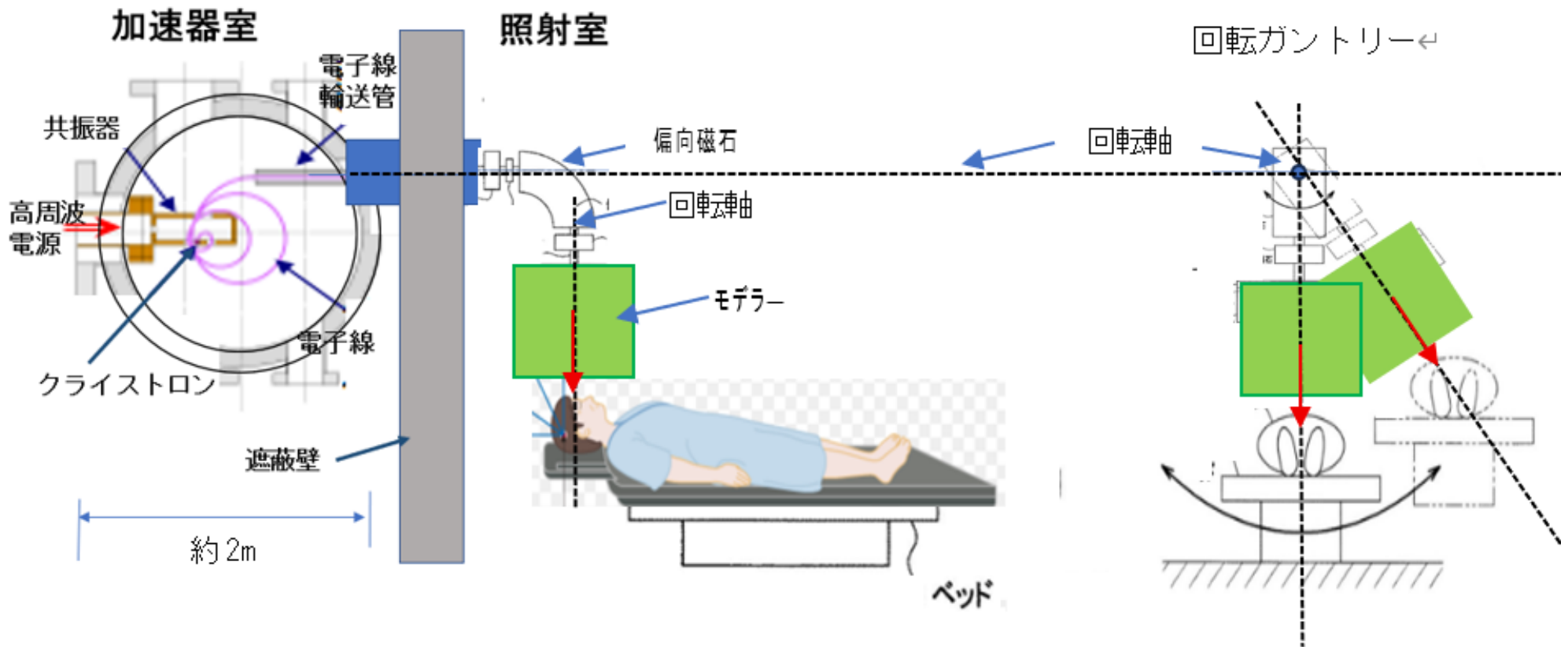
患部へ正確な位置・角度で中性子を照射するための医療用ガントリーを開発する。小型化された中性子源を活かし、病院内設置を前提とした実用的な照射システムを構築。



### ④ in-situ画像監視システムの統合

照射中に発生する即発ガンマ線を三次元ガンマカメラで観測し、照射位置および線量分布をリアルタイムで可視化する。これにより、治療のin-situ観察を可能とし、安全性および照射精度を飛躍的に向上させる。

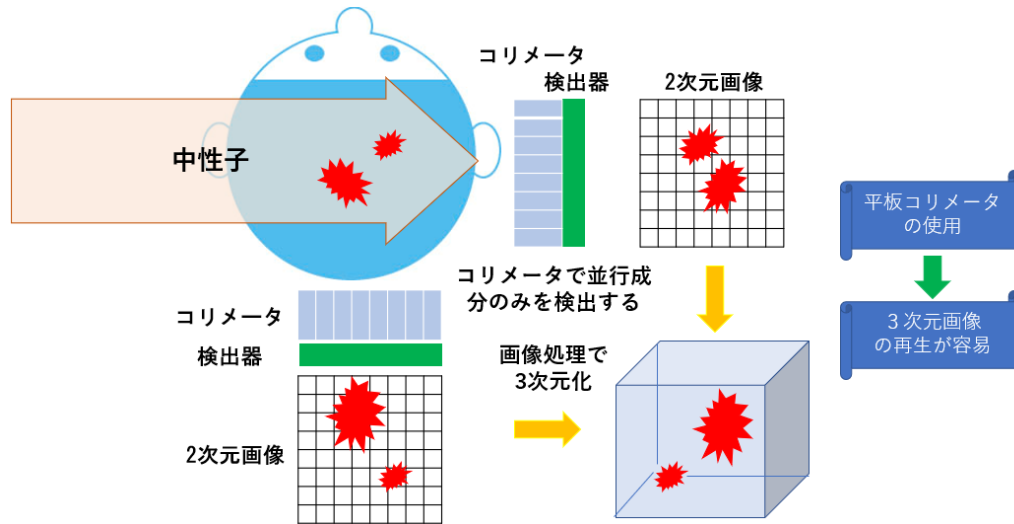
# 電子加速によるBNCT照射装置



## ガントリー構造

- ・ 照射位置及び角度は照射に応じて可変とする
- ・ 照射部位に応じてベッドの高さおよび位置を可変させる
- ・ 照射口と照射位置は自動的に整合する

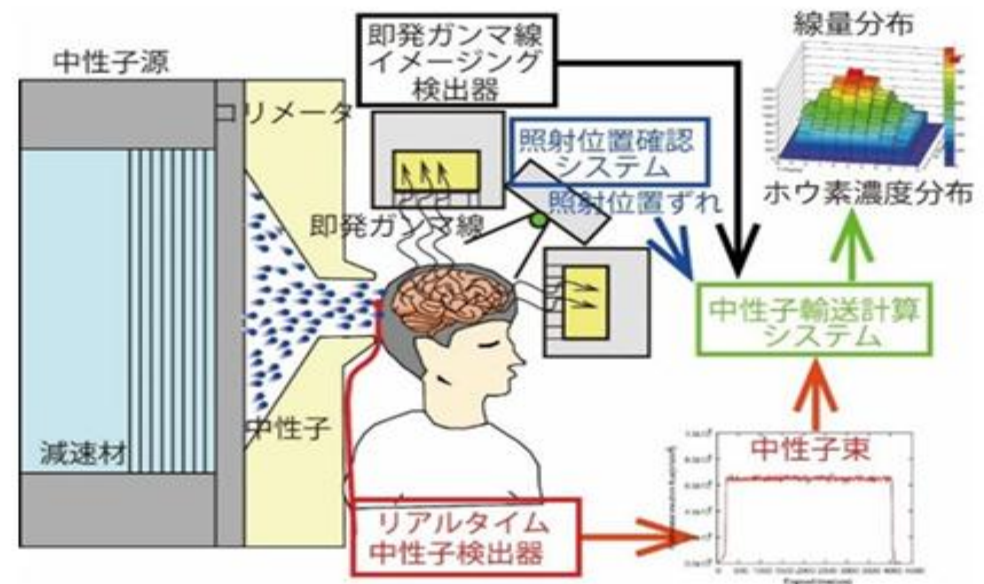
リアルタイム中性子モニター、照射位置ずれ検出装置や中性子輸送計算システムと組み合わせることにより、統合的BNCT線量評価システムの構築が必要。直角の2方向から2次元 $\gamma$ カメラで即発 $\gamma$ 線を観測し、このデータを基に癌組織の破壊状況をin-situで観察できる。



- 2次元ガンマカメラを活用し、3次元像を構成させる
- 3次元BNCTモニタリングシステム

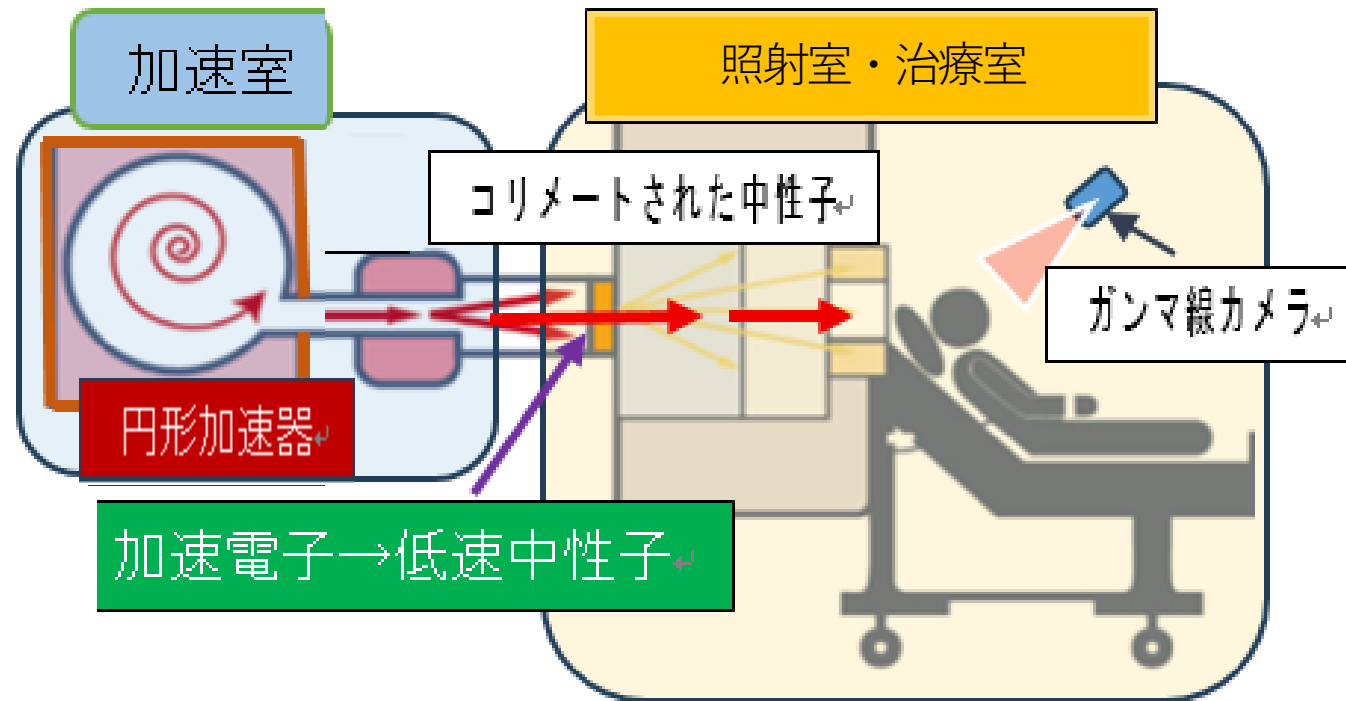


## BNCT線量評価システム



参照：京都大学複合原子力科学研究所におけるBNCT研究の現状、放射線 Vol. 46. No. 2 (2021)

# コンパクトなBNCT照射装置



加速器：電子を加速粒子とする。 加速が容易で、エネルギー効率が良い

→加速粒子を従来の陽子ではなく、電子を用いるメリット

・ 速中性子の発生が無い →放射化が少ない→遮蔽体構造が簡素

→BNCTに有効な中性子 (0.5eV~40keV) の発生が容易で高効率な低速中性子が発生できる

→加速粒子輸送管、遮蔽対構造体を含めて小型化できる (従来の1/5)

減速材：電子の加速による中性子は熱外中性子発生までの減速材が簡素で高効率

In-situ 治療の実現：即発ガンマ線を3次元ガンマカメラで観測しながら治療のin-situ観察が可能

電子加速器型BNCTは、粒子線治療と比較して導入・運用コストを大幅に低減できるだけでなく、国産中型加速器、電源、制御、放射線計測等の要素技術を幅広く包含することから、医療分野に留まらない産業波及効果が期待できる。

① 拡大する医療費・社会コストの抑制

- 短期治療
- 入院期間短縮
- 副作用低減による後治療削減

→ 中長期的な医療費抑制効果

② 装置産業としての付加価値が高い

- 加速器本体
- 中性子発生ターゲット
- 照射装置（ガントリー）
- 治療計画ソフト
- 線量評価・モニタ装置

→ 多層的な産業構造を形成

③ 国の重点政策と整合による波及効果

- がん対策基本法
- 医療機器国産化政策
- 原子力・加速器技術の平和利用

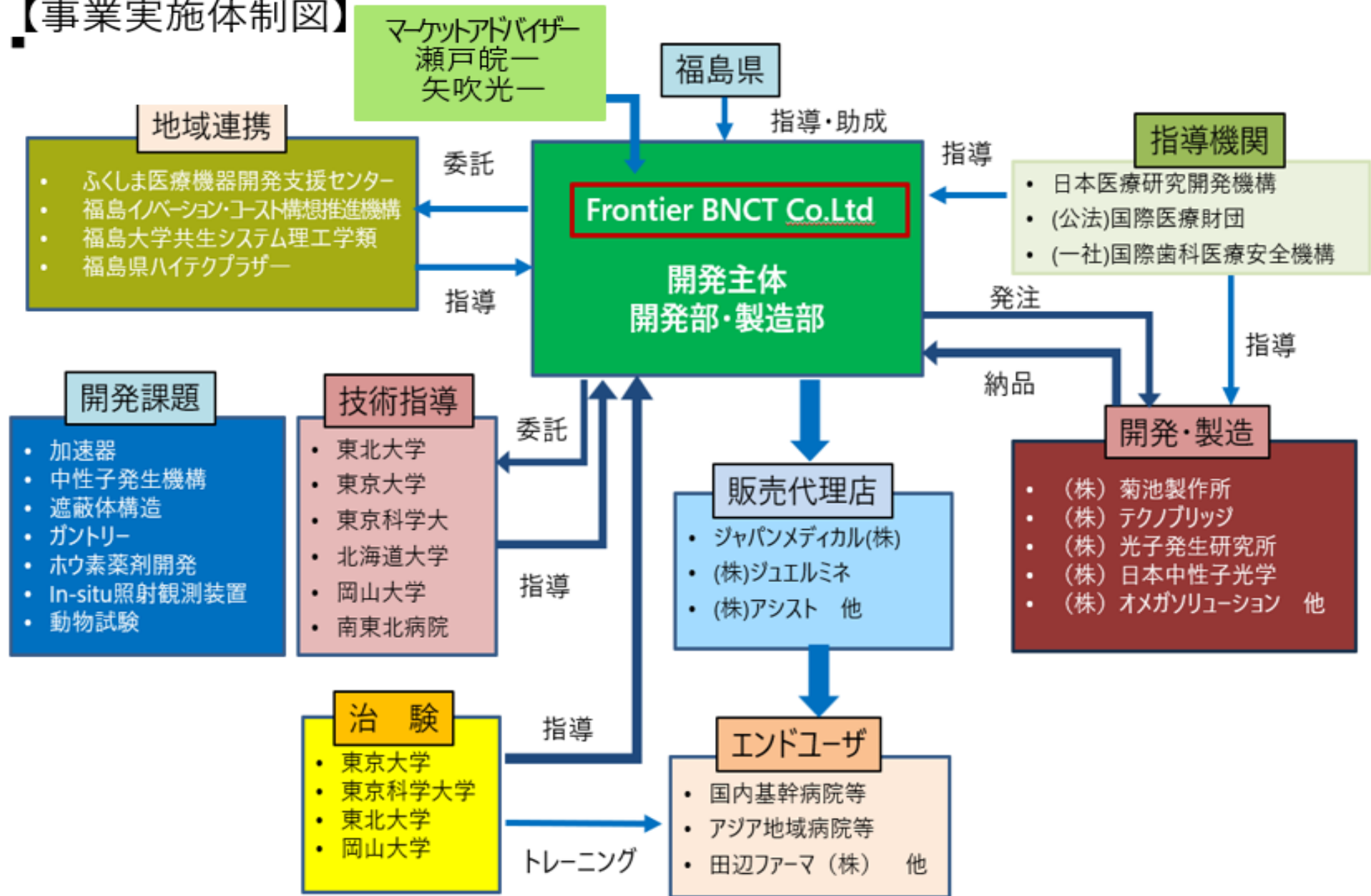
→ 医療輸出・技術輸出に有望

④ 海外展開ポテンシャルが大きい

- ・アジアを中心に高齢化、がん患者増加

# 開発課題と開発体制

【事業実施体制図】



Frontier BNCT

# ビジネススキーム

本事業で開発するBNCT装置の主なターゲット顧客は、がん治療を行う大学病院および高度医療機関である。特に放射線治療設備を有する大学病院やがん専門医療機関を中心に導入を進める。

## ① Frontier BNCT（当社）

装置の開発・製造および導入支援を実施するとともに、販売代理店や医療機関から得られるマーケット情報を製品開発へ反映する。

## ② 販売代理店

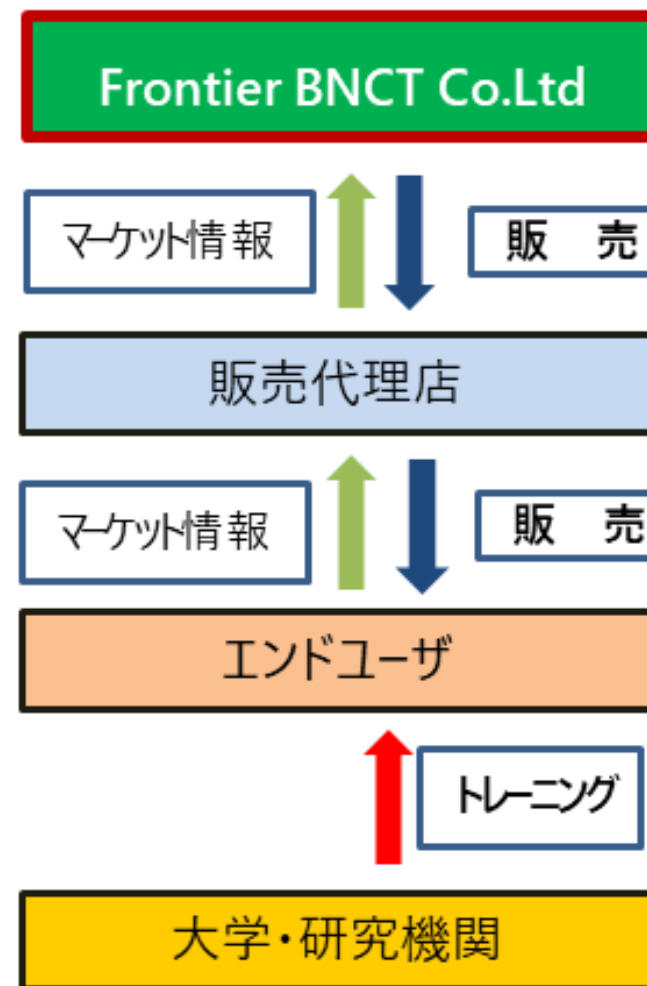
医療機器販売ネットワークを活用し、医療機関への営業活動および導入支援を行う。併せて、医療機関からのニーズや市場動向に関する情報を当社へフィードバックする。

## ③ 医療機関（エンドユーザー）

大学病院や地域基幹病院においてBNCT治療を実施し、装置導入後の運用を担うとともに、治療現場から得られる運用情報を市場ニーズとして共有する。

## ④ 大学・研究機関

技術教育および医療従事者向けトレーニングを実施し、装置導入後の運用人材の育成および技術普及を担う。



## ホウ素中性子捕獲療法(BNCT)市場概要

料提BNCコネクトの世界市場調査レポート (QYRESEARCH株SH器会社)

グローバルホウ素中性子捕獲療法(BNCT)市場規模は2025年にUSD 221.13と予測されており、2034年までにUSD 9187.51に達すると予測されており、年平均成長率は51.3%です。

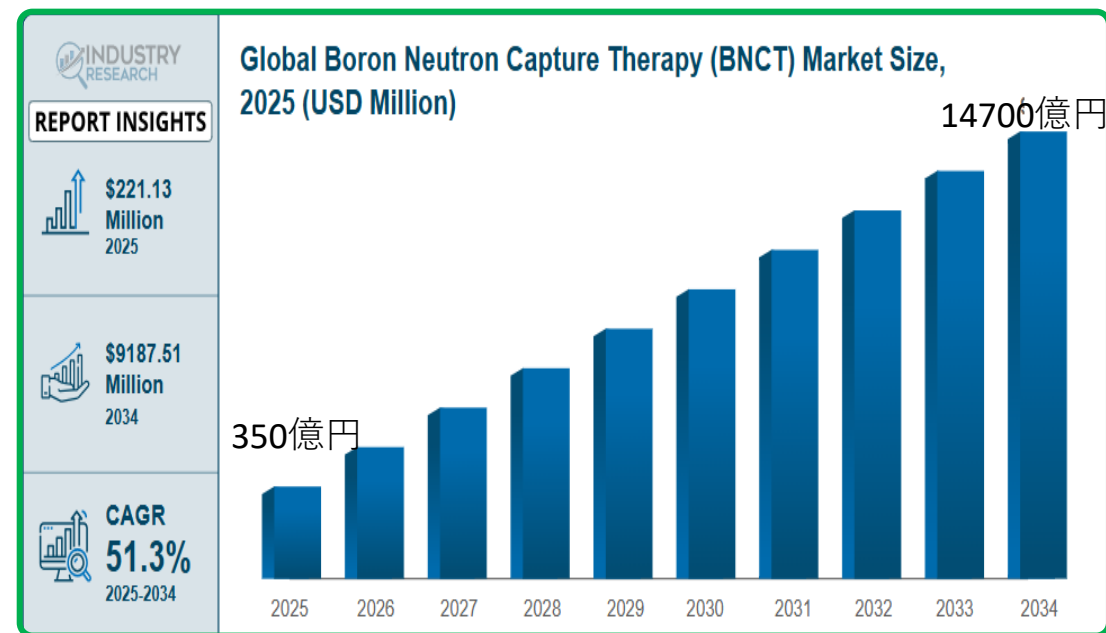
### ■環境分析

世界のBNCT市場規模は、2025年に約350億円と推定され、2034年には約1兆4700億円へ拡大すると予測されている(2025~2034年CAGR 51.3%)。がん罹患率の上昇に加え、正常組織を温存しながら腫瘍細胞を選択的に破壊する治療法への需要が市場拡大を牽引している。

一方で、従来型BNCTは、高額な建設費・大型陽子線加速器への依存・中性子資源確保の制約・医療機器承認に係る規制ハードルといった構造的制約により、世界的にも導入施設は限定的である。

- アジア地域におけるがん患者数の急増を背景とした治療需要の拡大
- 医療費および社会的損失の抑制ニーズの高まり(短期・低侵襲治療への期待)
- 切除を伴わない治療法としてのBNCTへの高い関心
- 電子線方式により設置経費を従来比約1/5へ低減できる技術的優位性
- in-situモニタリング技術による安全性・精度の高度化

精度の高度化特に、「高額で普及しない」という従来BNCTの最大の制約を解消できる点が、本事業の戦略的優位性である。



## 2031年～2036年の試算純利益

100万円

国内販売		2031年度	2032年度	2033年度	2034年度	2035年度	2036年度	合計
国内販売	受注台数	1	2	2	2	2	2	11
	純利益 12%	120	240	240	240	240	240	1320
海外販売 国内製造部分 30% +ロイヤリティ	受注台数	1	3	6	10	15	20	55
	国内製造部 1/3純利益	40	120	240	400	600	800	2200
	海外製造部 ロイヤリティ(10%)	100	300	600	1000	1500	2000	5500
	純利益	140	420	840	1400	2100	2800	7700
合計純利益		260	660	1080	1640	2340	3040	9020

国内販売：国内向け製造・販売の純利益  
 海外販売：海外受注部分の当社製造利益分  
 ロイヤリティ：海外受注分のロイヤリティ  
 販売価格の10%相当

