

NewSUBARUにおける高エネルギーガンマビームを利用したガンマ線誘起陽電子消滅測定装置の開発

○杉田健人 梅澤憲司 堀史説
大阪府立大学大学院工学研究科量子放射線

宮本修治 寺澤倫孝 橋本智 天野壮
兵庫県立大学高度産業科学技術研究所



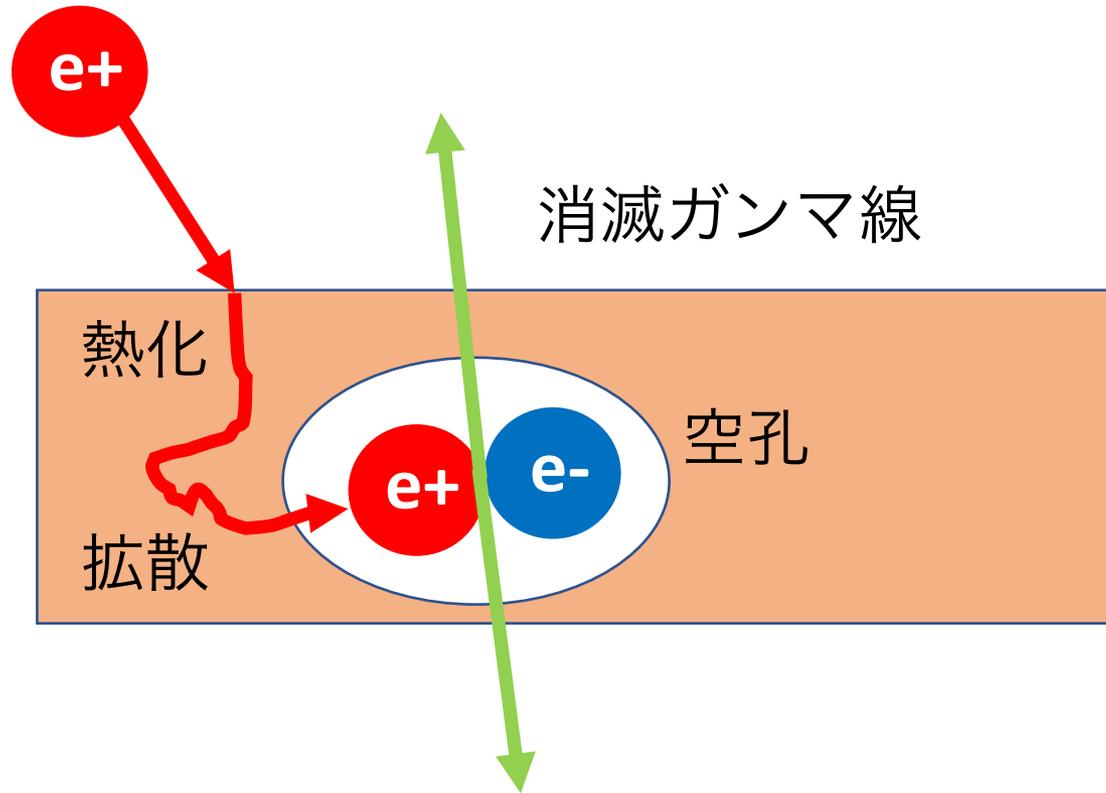
目次

1. 研究背景
2. LCSガンマ線・NewSUBARU
3. 実験装置 (FPAS)
4. 実験装置 (GiPS)
5. まとめ

目次

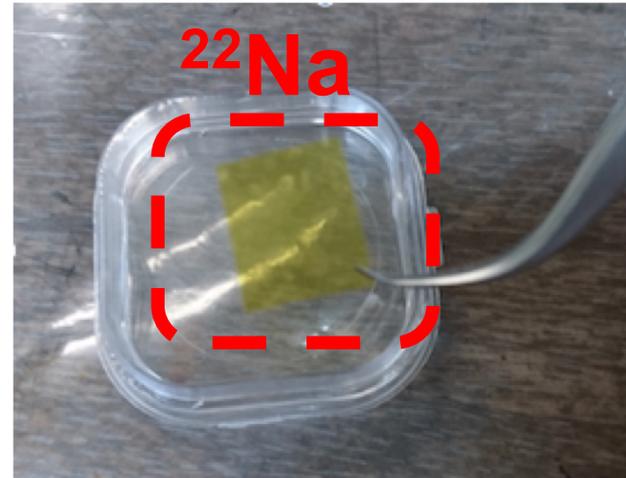
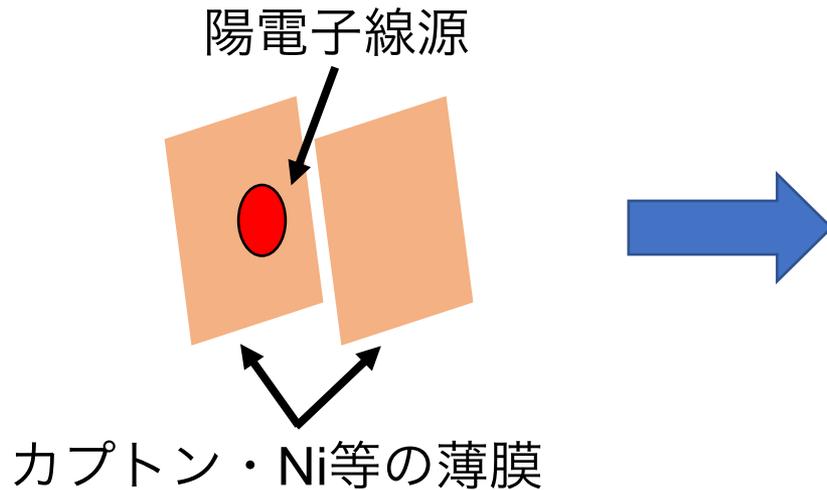
1. 研究背景
2. LCSガンマ線・NewSUBARU
3. 実験装置 (FPAS)
4. 実験装置 (GiPS)
5. まとめ

陽電子消滅法

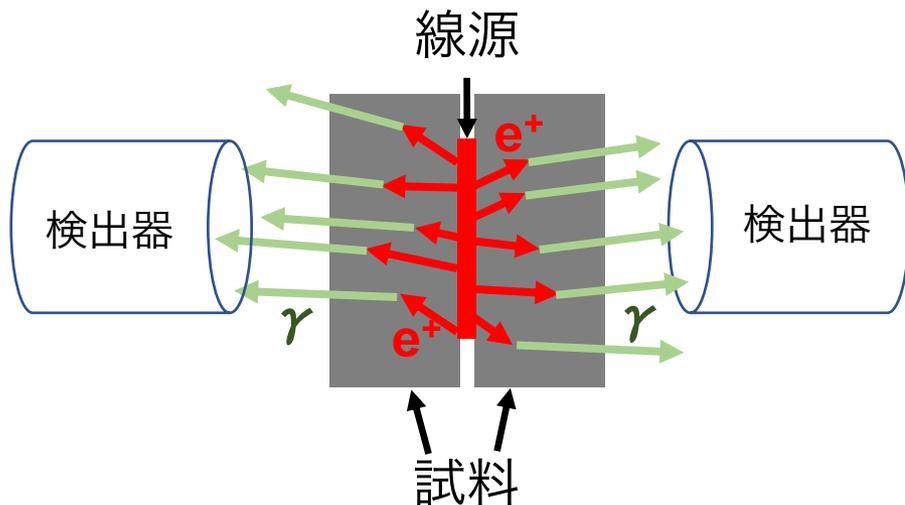


- 陽電子は物質中で熱化の後に拡散。負のポテンシャルを感じる空孔などの**空隙を自己探索**する
- 陽電子は電子と対消滅を起こし消滅ガンマ線を放出。
消滅ガンマ線には電子の情報が付与される
(電子の運動量→ドップラー拡がり, 電子密度→陽電子寿命)

非密封線源を使用する実験

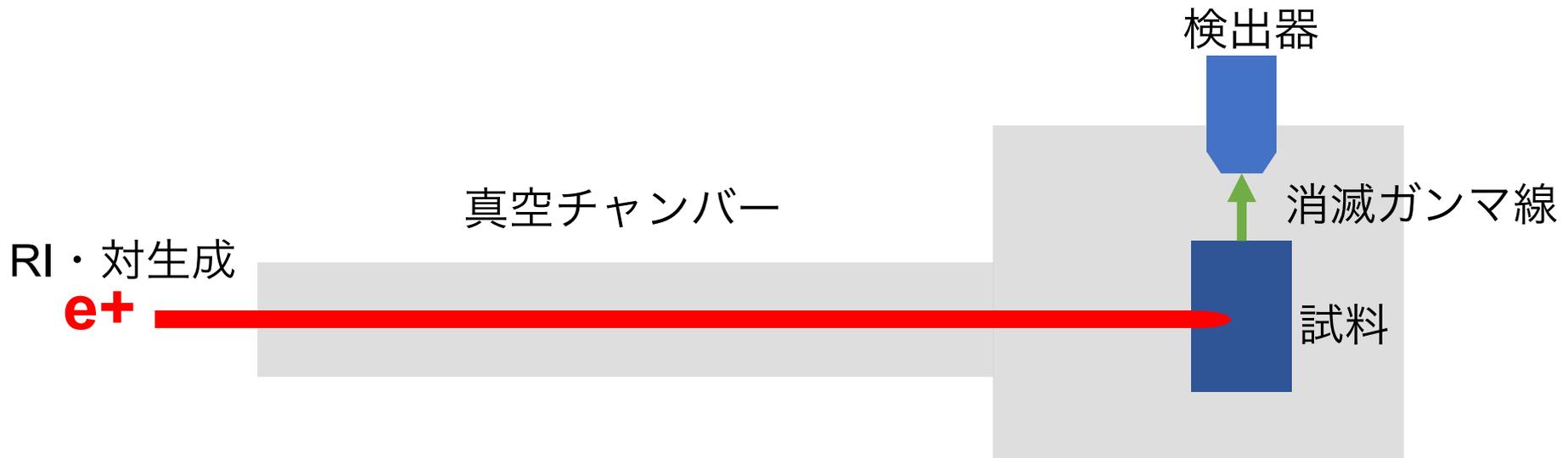


線源を試料で挟んで測定



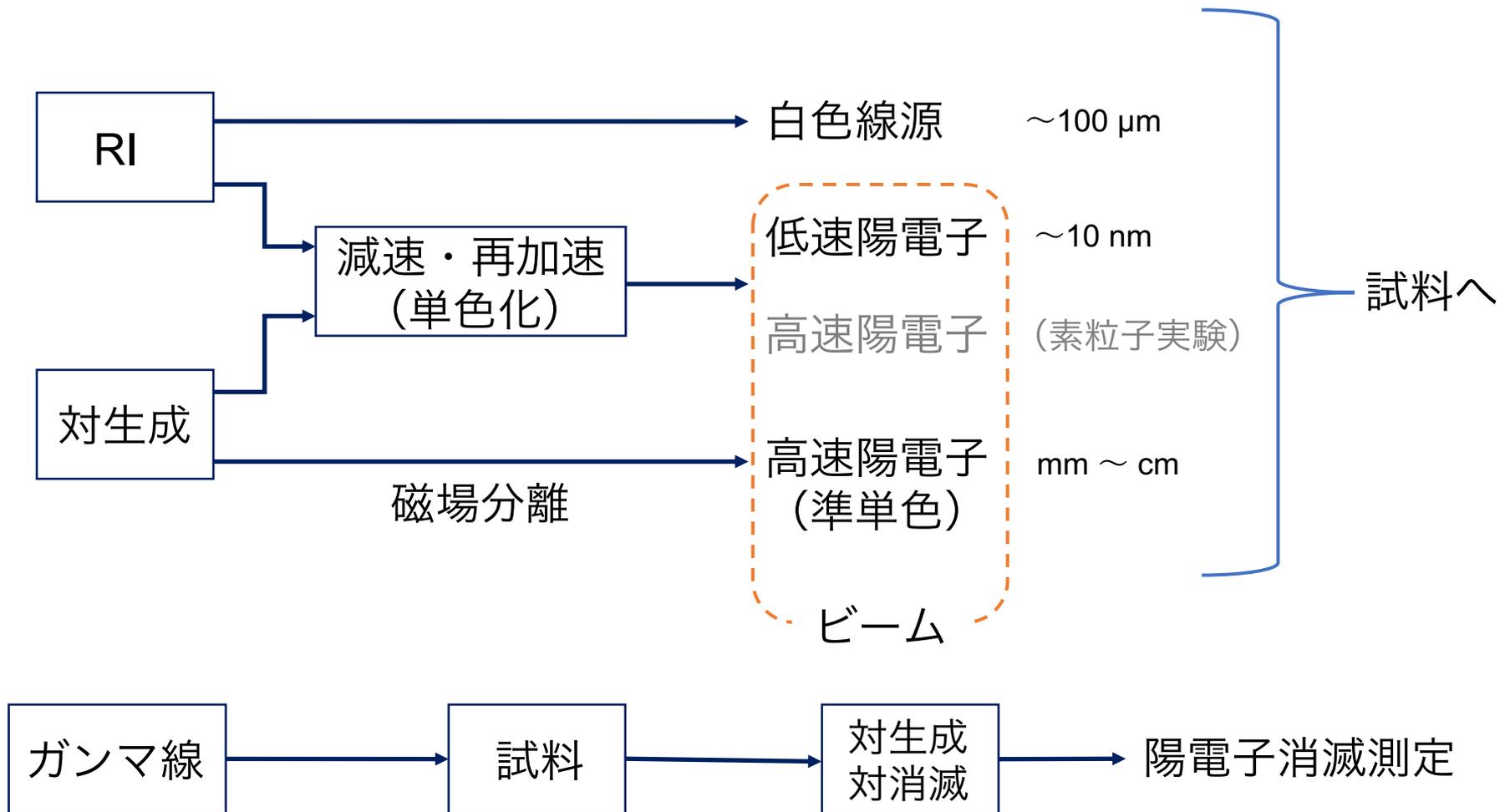
- ・測定データにカプトン等の薄膜中の陽電子消滅成分が混ざる
- ・陽電子エネルギーが白色
- ・同一情報を持つ試料が2つ必要
- ・RIの半減期、管理...

加速器を使うメリット



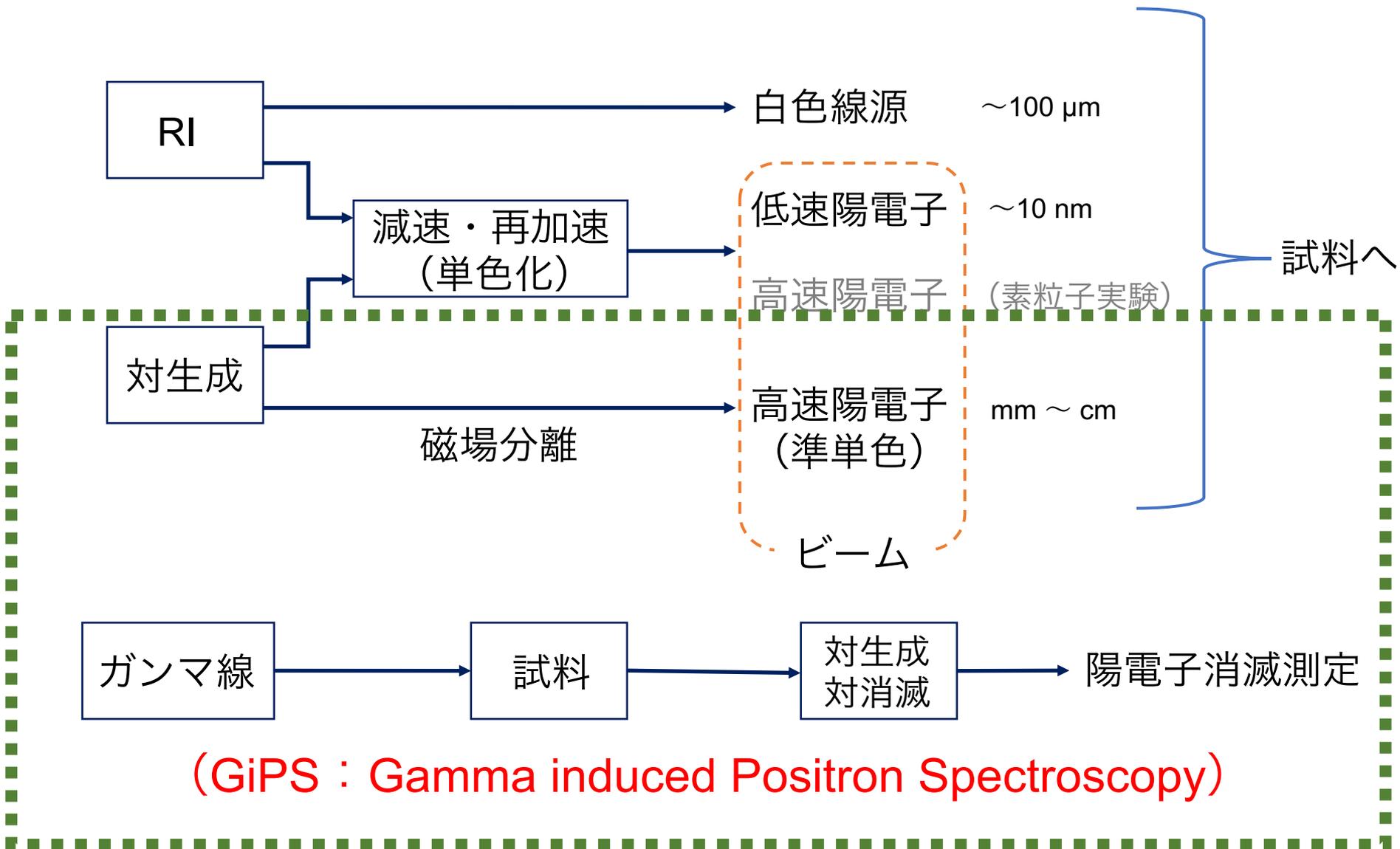
- ・ 陽電子をビーム化することで測定データに線源成分を含まない
- ・ 単一試料で測定可能
- ・ ビーム軌道制御による測定領域の調整、エネルギーの単色化により注入深さ制御

陽電子線源



(GiPS : Gamma induced Positron Spectroscopy)

陽電子線源



(GiPS : Gamma induced Positron Spectroscopy)

本研究の陽電子装置

研究目的

レーザーコンプトン散乱（LCS）ガンマ線によるバルク材料を標的とした陽電子消滅測定装置の開発

- ▶ LCSガンマ線システム
陽電子生成シミュレーション
- ▶ **FPAS** (Fast Positron Annihilation Spectroscopy)
高速陽電子を用いた陽電子消滅測定
- ▶ **GiPS** (Gamma induced Positron Spectroscopy)
LCSガンマ線直接入射による陽電子消滅測定

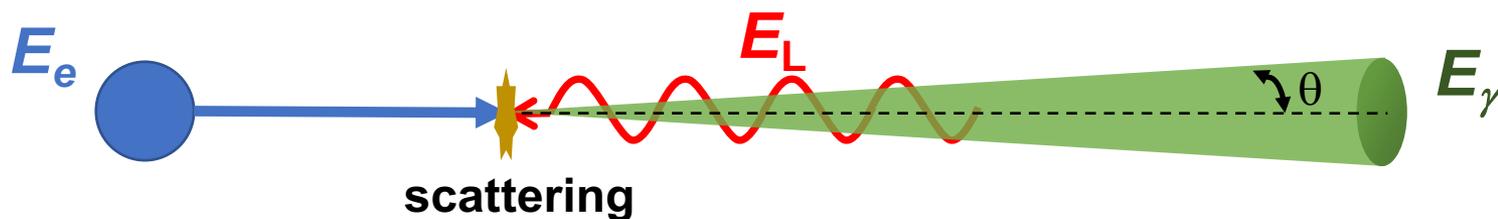
バルク材料に対する陽電子消滅測定のデモンストレーションを紹介する

目次

1. 研究背景
- 2. LCSガンマ線・NewSUBARU**
3. 実験装置 (FPAS)
4. 実験装置 (GiPS)
5. まとめ

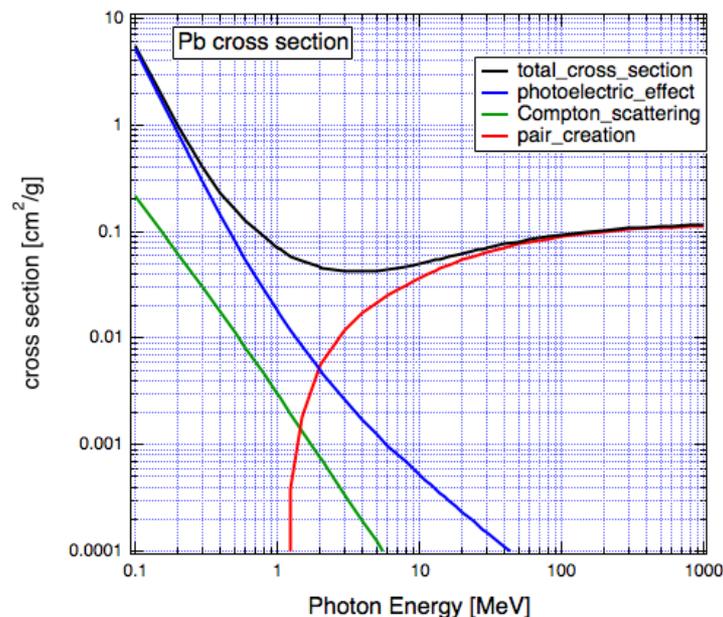
LCSガンマ線

LCSガンマ線 ▶ 相対論的電子とレーザー光子の散乱



$$E_\gamma = \frac{4\gamma^2 E_L}{1 + \gamma^2 \theta^2 + \frac{4\gamma E_L}{m_e c^2}} \approx 4\gamma^2 E_L \quad \gamma = \frac{E_e}{m_e c^2}$$

- I. 電子エネルギーとレーザー波長でガンマ線エネルギーが調整可能
- II. γ に反比例する発散角を持ち指向性が高い、照射領域のアライメントが容易



NewSUBARU

NewSUBARU Synchrotron Radiation Facility
at Hyogo, Japan

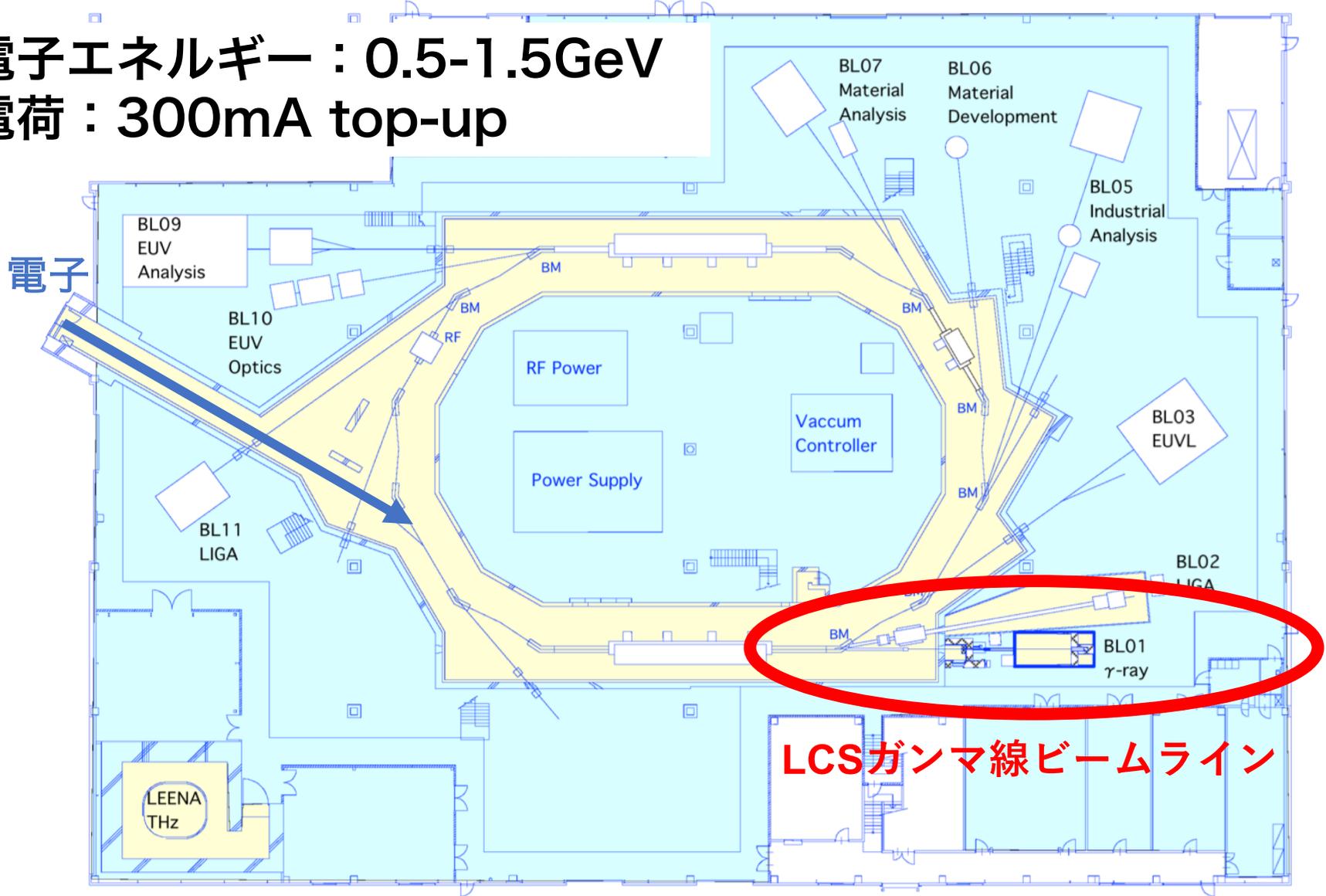


SPring-8

NewSUBARU

NewSUBARU蓄積リング

電子エネルギー：0.5-1.5GeV
電荷：300mA top-up



NewSUBARU-BL01のLCSガンマ線

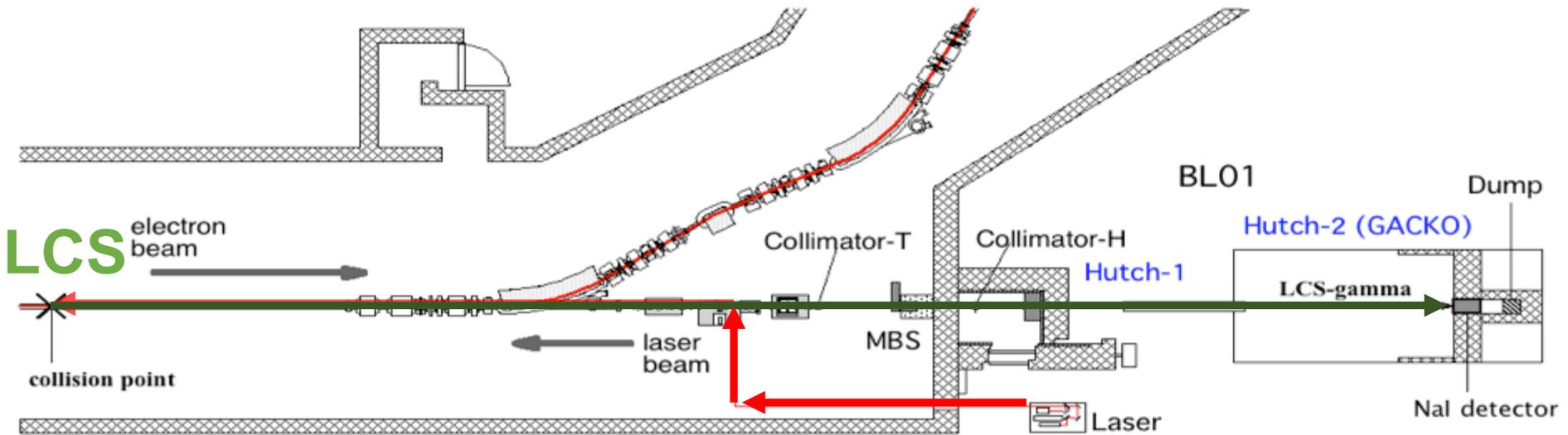
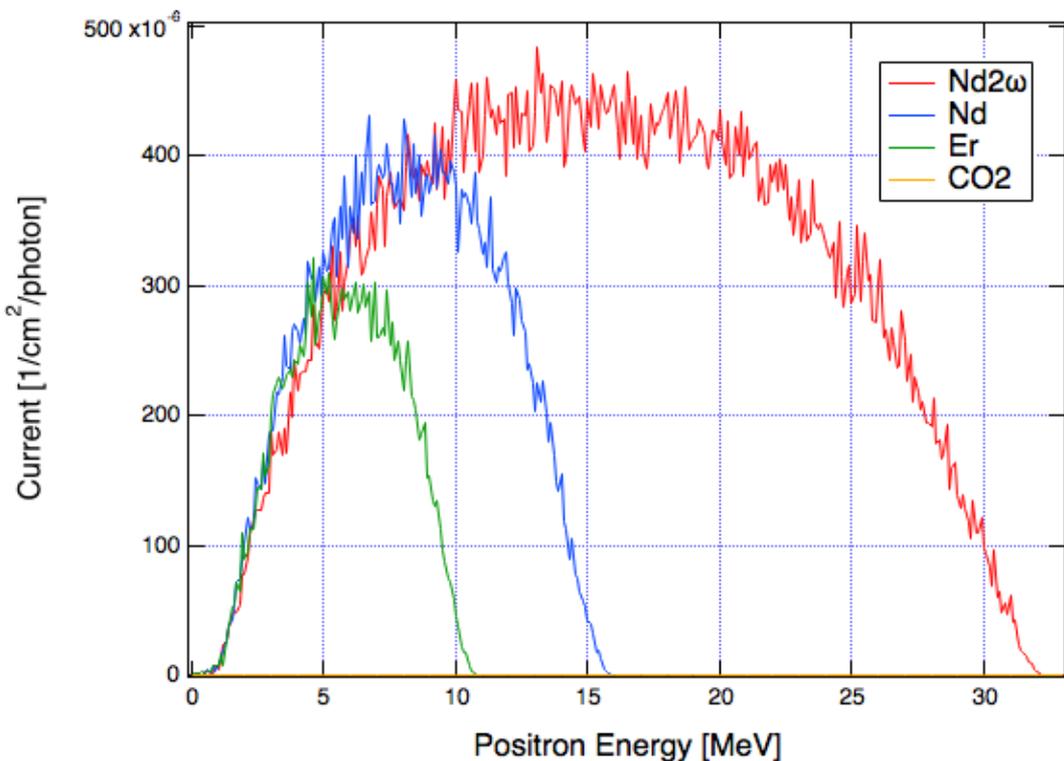


TABLE. Conditions of LCS gamma beam generation at NewSUBARU-BL01 (1 GeV operation)

Laser		LCS gamma beam		
	Wavelength [nm]	Power [W]	Energy [MeV]	Flux [photon/s]
Nd 2 ω	532	15	33.3	1.5×10^6
Nd	1064	15	16.9	8.5×10^6
Er	1540	4	11.8	6.1×10^5
CO ₂	10592	8	1.73	1.3×10^6

FP生成シミュレーション

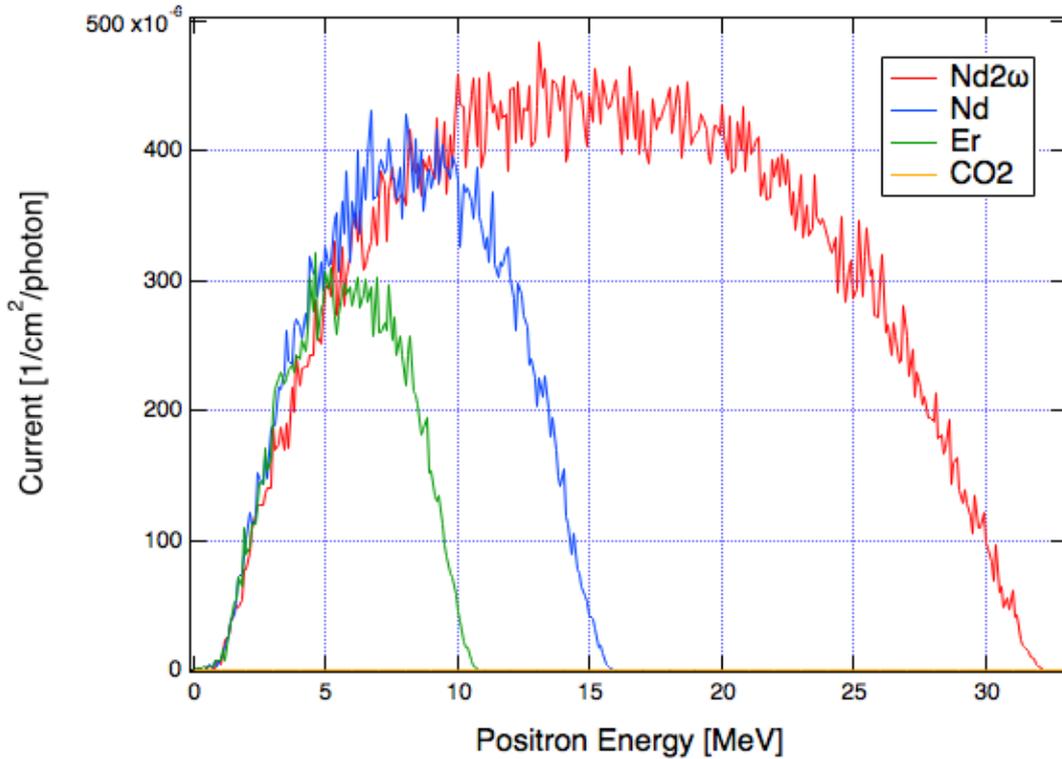


- ▶ PHITSによる光子を厚さ3mmの鉛に入射した場合の陽電子取り出しシミュレーション
- ▶ ガンマ線フラックスの関係から実験にはNdレーザーを使用
- ▶ 実験において高速陽電子は磁場による軌道制御でエネルギー選択

図. 生成陽電子エネルギー分布

Laser	LCS- γ エネルギー	陽電子取り出し効率	陽電子ピークエネルギー
Nd2 ω	33.3 MeV	9.7 %	14 MeV
Nd	16.9 MeV	3.8 %	8 MeV
Er	11.8 MeV	1.8 %	5 MeV
CO ₂	1.73 MeV	0 %	—

FP生成シミュレーション

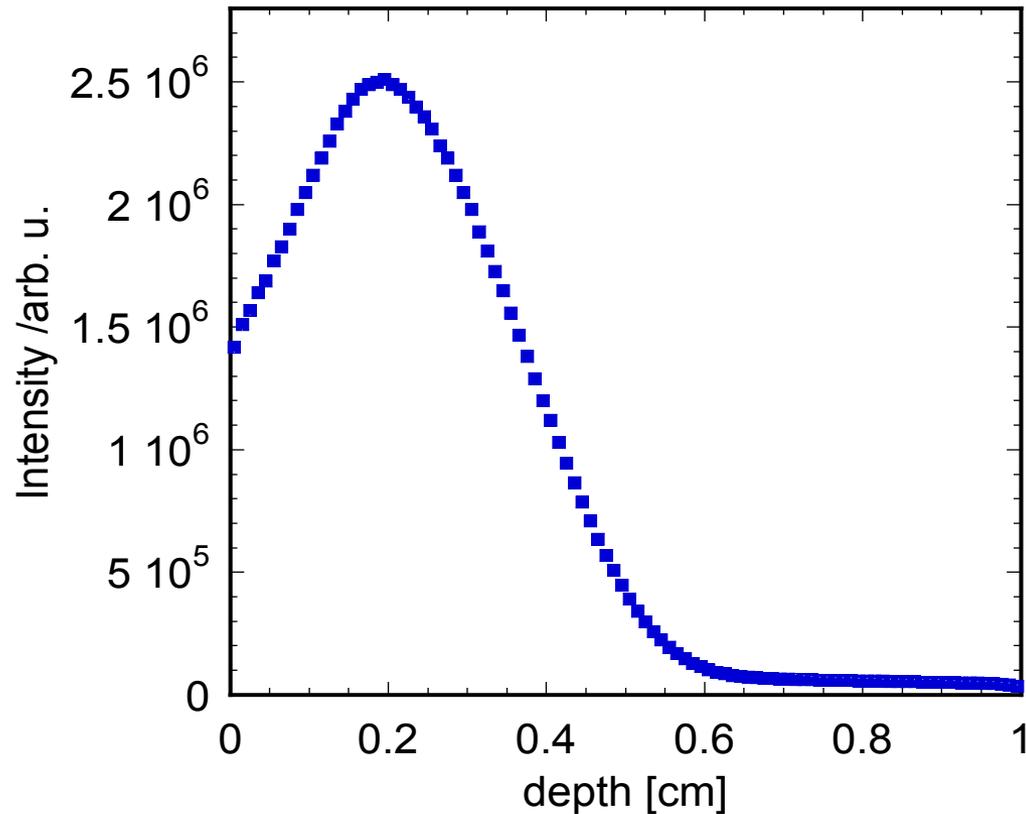


- ▶ PHITSによる光子を厚さ3mmの鉛に入射した場合の陽電子取り出しシミュレーション
- ▶ ガンマ線フラックスの関係から実験にはNdレーザーを使用
- ▶ 実験において高速陽電子は磁場による軌道制御でエネルギー選択

図. 生成陽電子エネルギー分布

Laser	LCS- γ エネルギー	陽電子取り出し効率	陽電子ピークエネルギー
Nd2 ω	33.3 MeV	9.7 %	14 MeV
Nd	16.9 MeV	3.8 %	8 MeV
Er	11.8 MeV	1.8 %	5 MeV
CO ₂	1.73 MeV	0 %	—

FPの注入深さ



8MeV陽電子の鉄注入深さシミュレーション

- 8MeV陽電子は鉄の表面から最大6mmまで侵入する

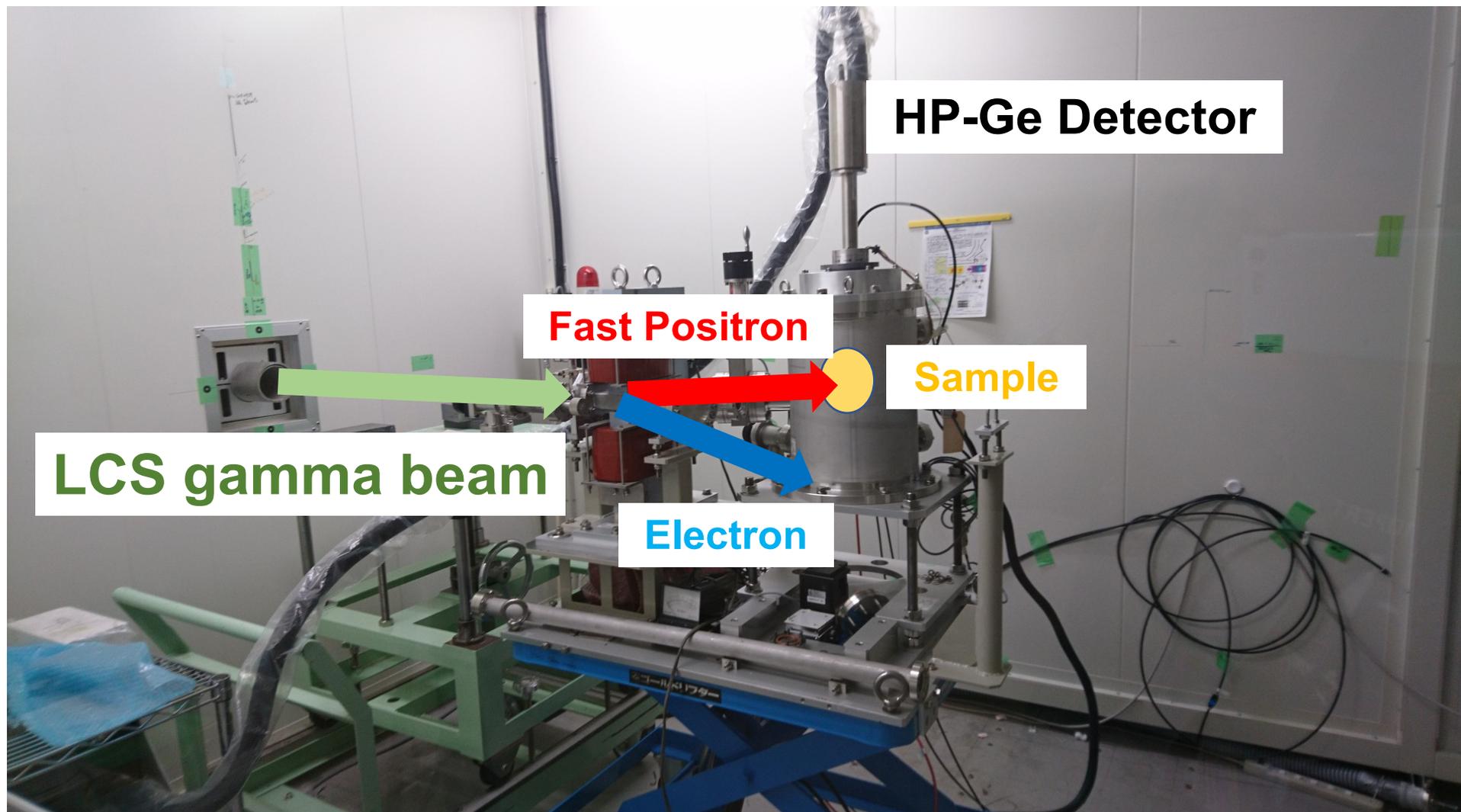
目次

1. 研究背景
2. LCSガンマ線・NewSUBARU
- 3. 実験装置 (FPAS)**
4. 実験装置 (GiPS)
5. まとめ

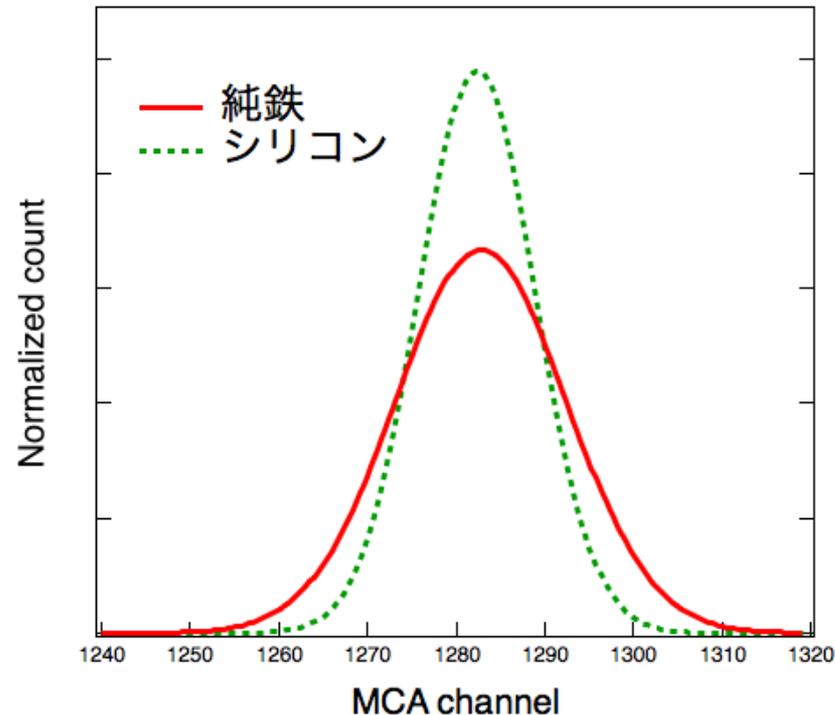
FPASチャンバー



FPASチャンバー



8MeV FPのDopplerプロファイル



試料	サイズ	カウント	計数率
純鉄	20 × 40 × t7mm	7.9×10^4	3.7 count/s
シリコン	20 × 45 × t17mm	7.2×10^4	10 count/s

- シリコンの密度が低く内部の空隙が大きいため運動量の低い電子との消滅確率が増加→スペクトルが先鋭化
- 計数率の違いは主に実験時のレーザー出力が原因

FPASの特徴

メリット

- MeV領域の陽電子は大気中での減衰が少なく、大気中でその場測定が可能
- 使用するレーザーの切り替え、磁場の調節により様々な陽電子エネルギーが選択

試料深さ分布に関する情報が得られる

デメリット

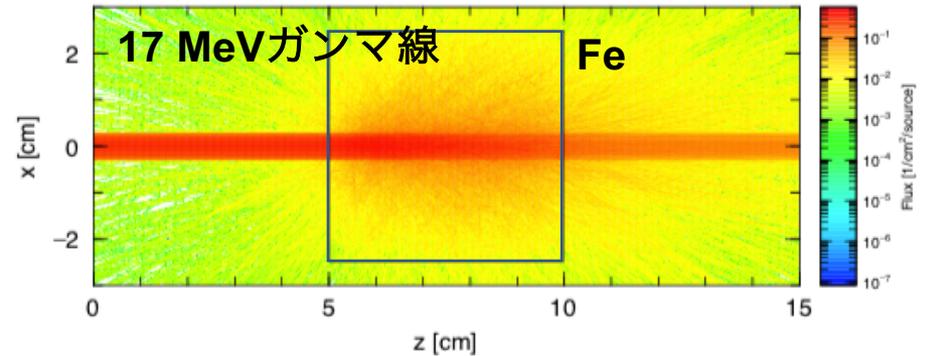
- エネルギーが最大で14MeV程度で測定できる試料厚さが数cmまで。それより深部の情報を得るには試料切り出し等の加工が必要。

目次

1. 研究背景
2. LCSガンマ線・NewSUBARU
3. 実験装置 (FPAS)
- 4. 実験装置 (GiPS)**
5. まとめ

GiPSの特徴

- ▶ 高エネルギーガンマ線は物質に対する透過能が高い
→ 大きなバルク材の非破壊測定可能



- ▶ ガンマ線が通過する領域に沿って陽電子生成・消滅がおこる

↓
GiPSの観察領域

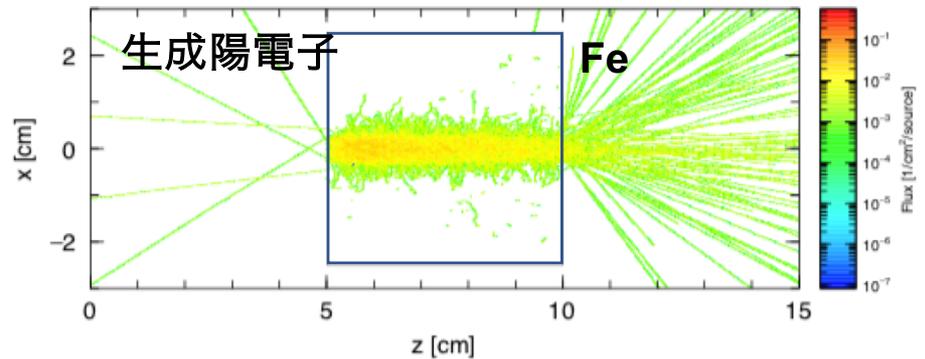
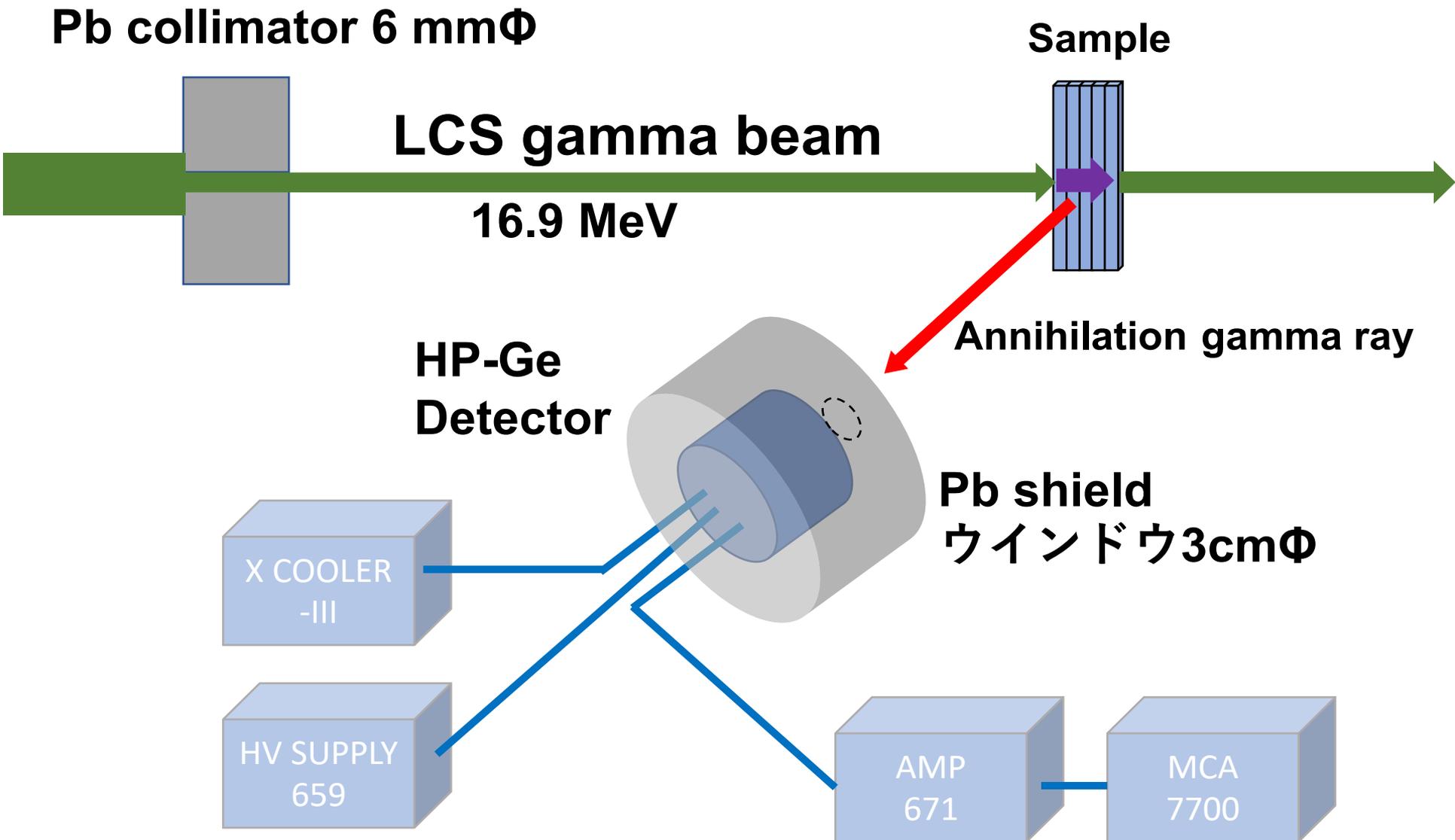
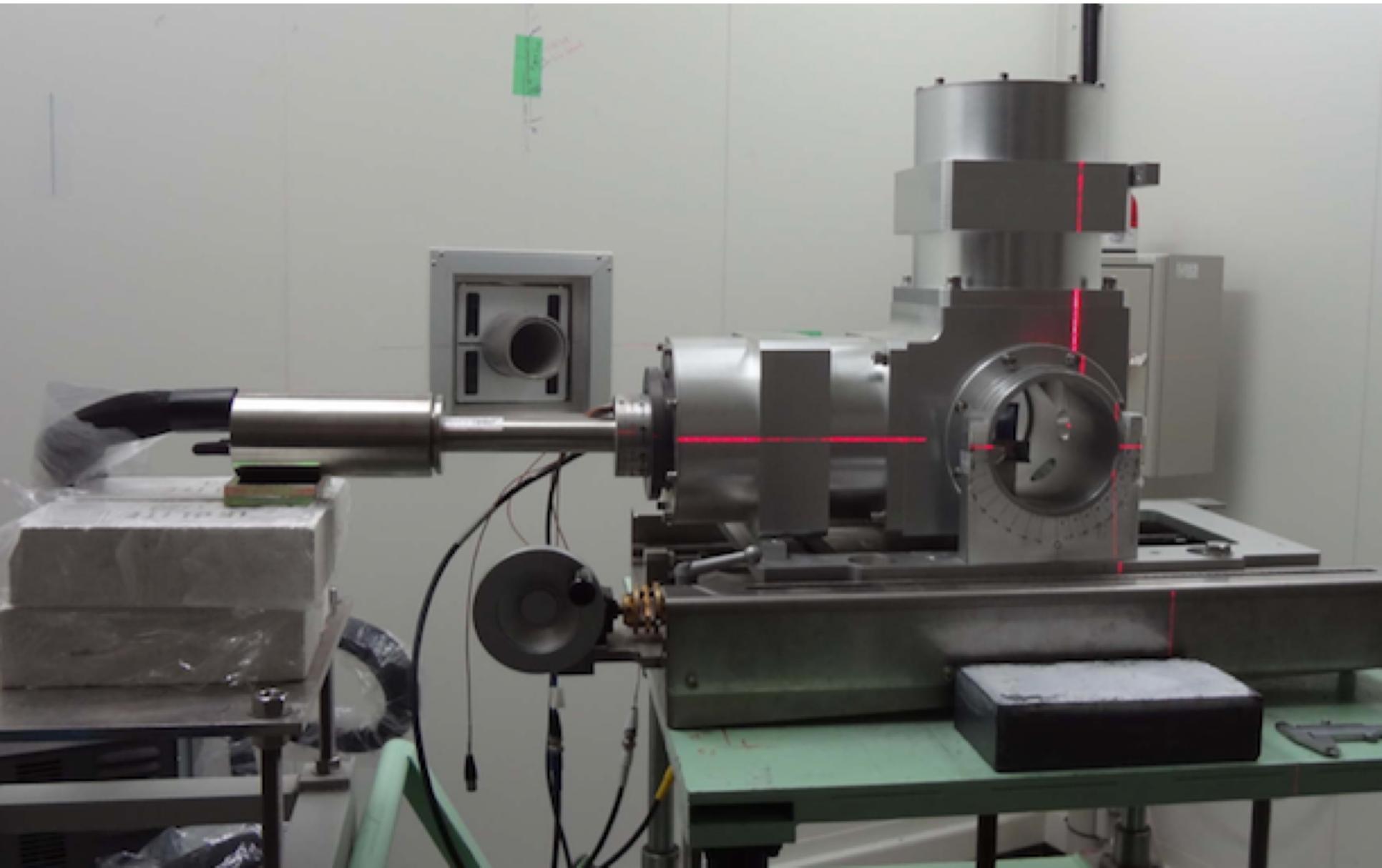


図. 17MeVガンマ線による鉄（厚さ5 cm）のGiPSシミュレーション

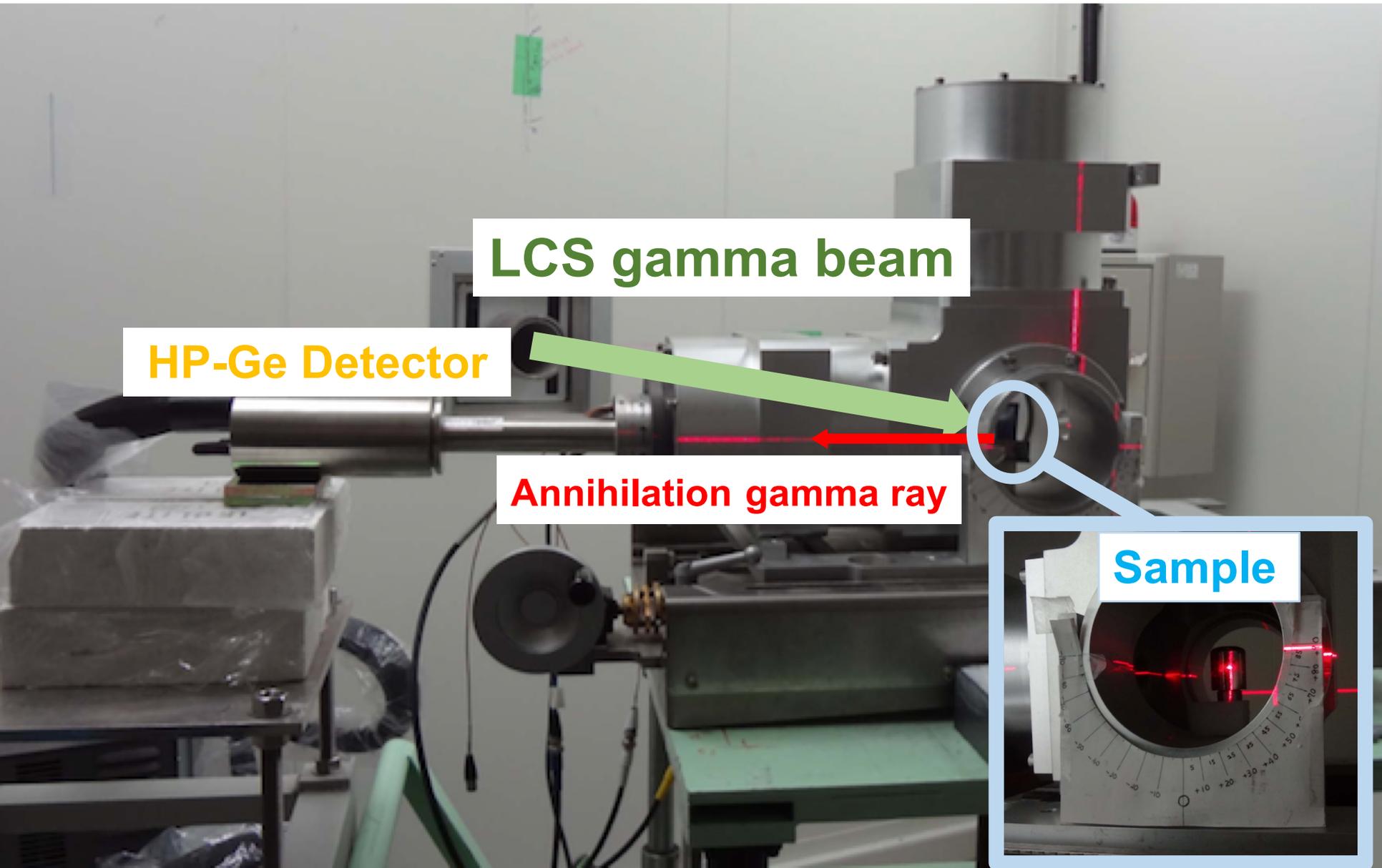
実験配置



実験配置



実験配置



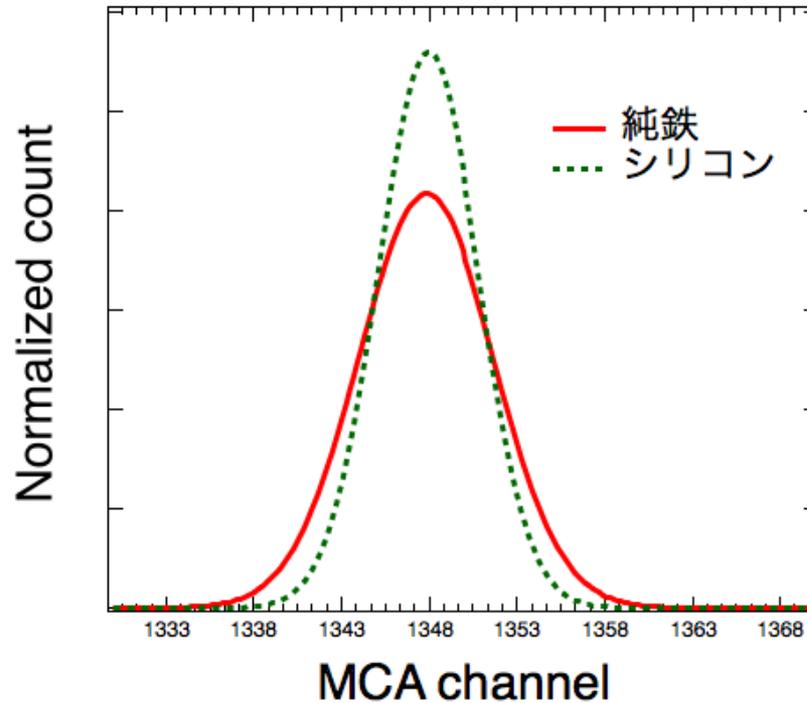
LCS gamma beam

HP-Ge Detector

Annihilation gamma ray

Sample

GiPS Dopplerプロファイル



試料	サイズ	カウント	計数率
純鉄	20 × 40 × t5mm	1.1×10^6	104 count/s
シリコン	20 × 45 × t17mm	4.8×10^5	186 count/s

- ・ カウントレートは試料のサイズと密度に依存、高速陽電子と比べて測定時間が短い
- ・ LCSガンマ線の通過する領域を中心に試料を観察

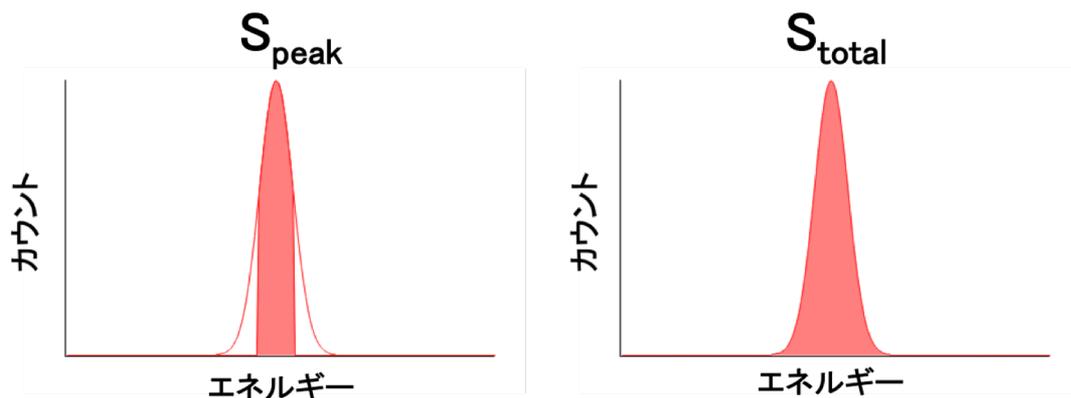
目次

1. 研究背景
2. LCSガンマ線・NewSUBARU
3. 実験装置 (FPAS)
4. 実験装置 (GiPS)
- 5. まとめ**

FPASとGiPS

Table. FPASとGiPSのSパラメータ比較

	純鉄	シリコン
FPAS	0.548	0.715
GiPS	0.566	0.708



$$S = \frac{S_{peak}}{S_{total}}$$

- Sパラメータ=ドップラープロファイルの中心と全体の面積比による空隙の評価指標
- 基準試料（純鉄）で同等程度の値になるようにピークの範囲を決めた

FPASとGiPS

Table. FPASとGiPSのSパラメータ比較

	純鉄	シリコン
FPAS	0.548	0.715
GiPS	0.566	0.708

- ・ FPASとGiPSについて同等の結果が得られた
- ・ これらの測定は本来観察領域が異なるが、今回測定した試料が全体的に均質であるため、妥当な結果である。
- ・ 現在、バルク合金の測定、陽電子寿命測定 of 導入による測定の高度化を行っている