

京大複合研電子ライナックでの 同位体製造

窪田卓見
京大複合研

ILCの多角的活用を考える会II 2018年7月5日～6日 京都大学宇治キャンパス

発表内容

- 施設の紹介
 - 現状と今後の計画
- 同位体製造の例
 - 光量子照射

京大複合研

- 正式名称
 - 京都大学 複合原子力科学研究所
 - Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University (KURNS)
 - 18年3月末までは、京都大学 原子炉実験所
- 場所
 - 大阪府熊取町



3

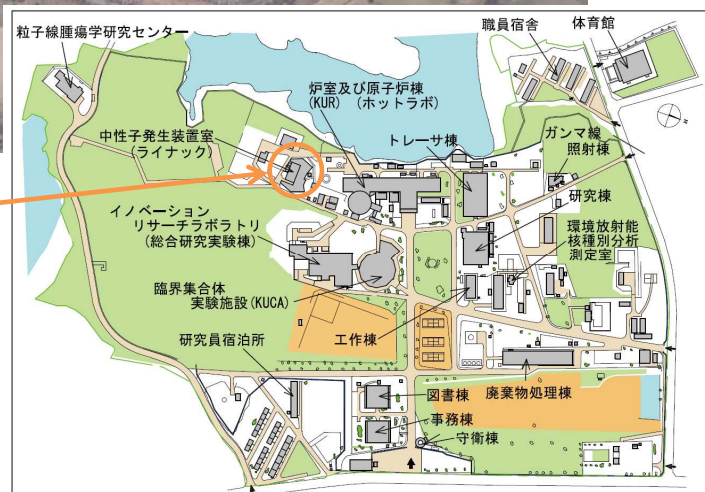
KURNS

京都大学複合原子力科学研究所

Institute for Integrated Radiation and Nuclear Science, Kyoto University



電子ライナック



複合研ライナックの概要

設置目的

研究炉: 定常中性子源



相補的な利用

ライナック: パルス中性子源



1965年 購入・設置

米国High Voltage Engineering社製
ARCO L-1512G型電子線型加速器

1972年 2本目加速管増設
エネルギー増強

加速管以外は都度リニューアル

現在は汎用量子ビーム生成装置としての性格

スタッフ

- 施設管理者
- マシン担当技術職員: 1名
- 派遣(元技術職員): 1名
- 研究担当教員: 2名

電子ビームの仕様

特長

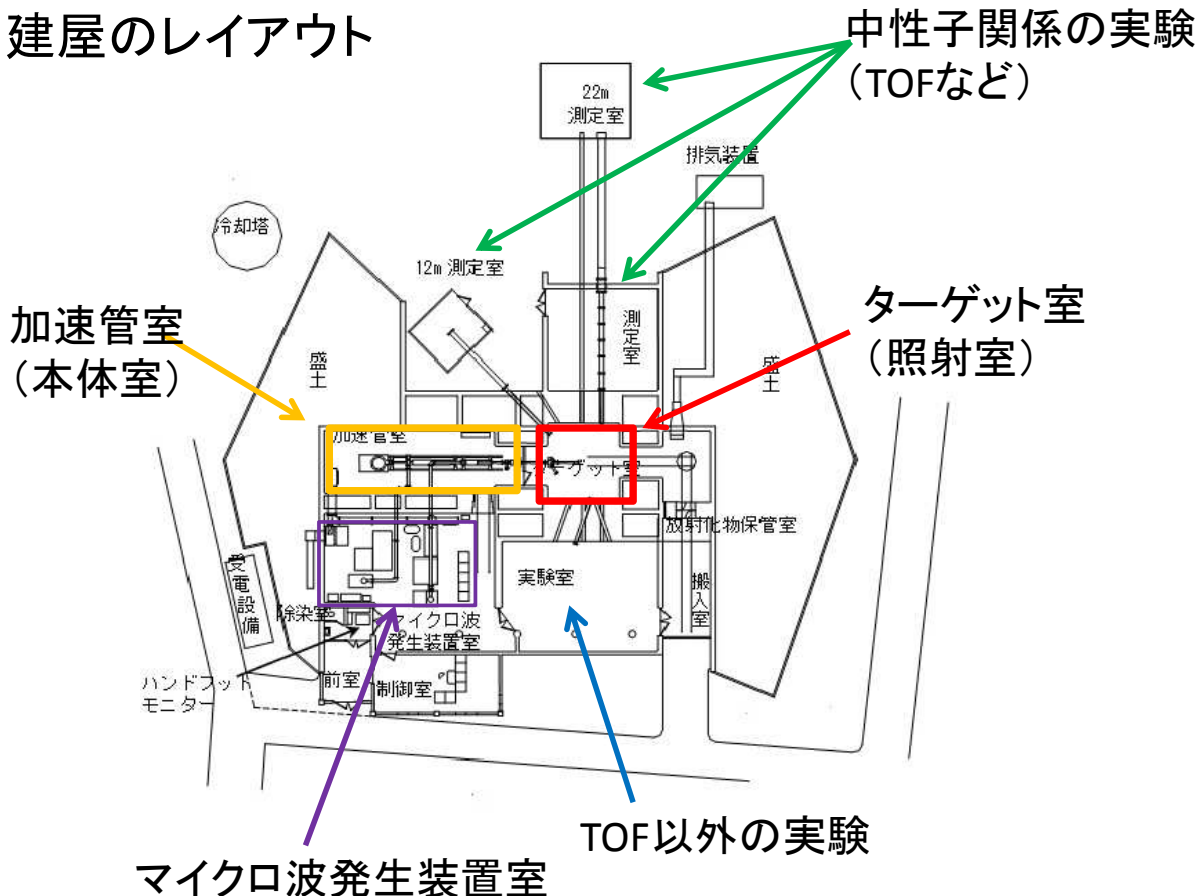
- レバンド、高繰り返しのため大電流が可能
- 可変範囲が広い = 汎用的に使える

平均電流300 μ A超は国内最高(数十MeVクラスの電子ライナック)

主なビームスペック

	Long Pulse モード	Short Pulse モード
エネルギー	6 MeV ~ 46 MeV	
ビームパワー	最高 10 kW	
パルス幅	0.1 ~ 4 μ s	2 ns ~ 100 ns Single Bunch
パルス繰返し	Single, 1~ 180 Hz	Single, 1~ 360 Hz
ビーム尖頭電流	500 mA	5 A
ビーム平均電流	330 μ A	180 μ A

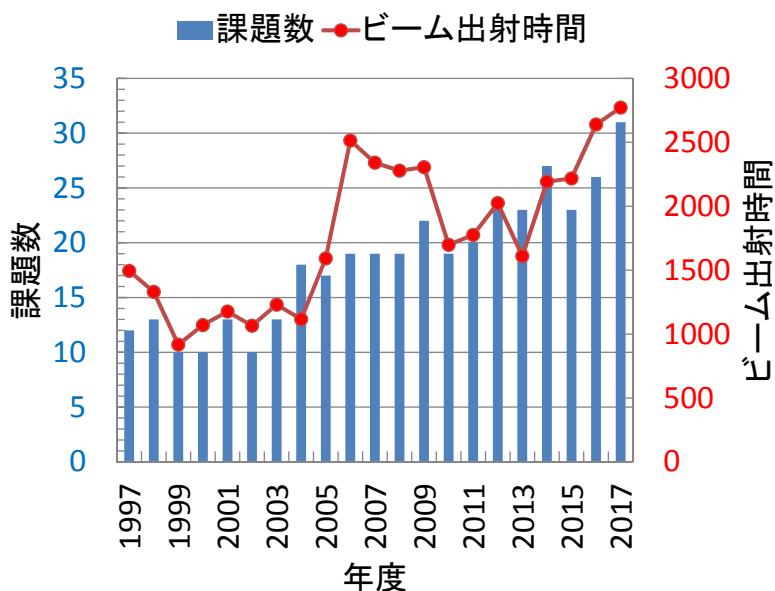
建屋のレイアウト



7

運転・利用の状況

共同利用研究課題数とビーム出射時間の直近20年間の推移



利用者数(2017年度)

所属機関	年間使用延べ人数 (人・日)
所内・学内	920
国立大学	209
公立大学	182
私立大学	107
独立行政法人等	55
民間機関	4
計	1,477

8

利用の状況

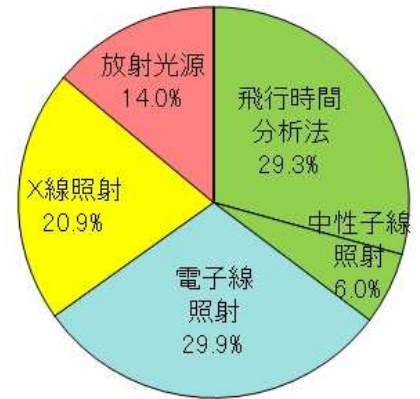
可変範囲が広い = 多様な目的に使える

- 低エネルギー (6MeV) ~ 高エネルギー (46MeV)
- 超微弱ビーム (<1pA) ~ 大電流 (>300μA)
- 多様な時間構造のパルスビーム

量子ビーム別の利用分野

量子ビーム	実験
パルス中性子	中性子TOF法による核データ取得
高エネルギー及び低エネルギー電子線	金属・半導体への電子線照射効果(物性研究・材料開発)
制動X線照射	RI製造, 光放射化分析
テラヘルツ放射光	テラヘルツ・ミリ波分光(物性研究・光源開発)
超微弱ビーム電子線	検出器開発、半導体部品の放射線耐性

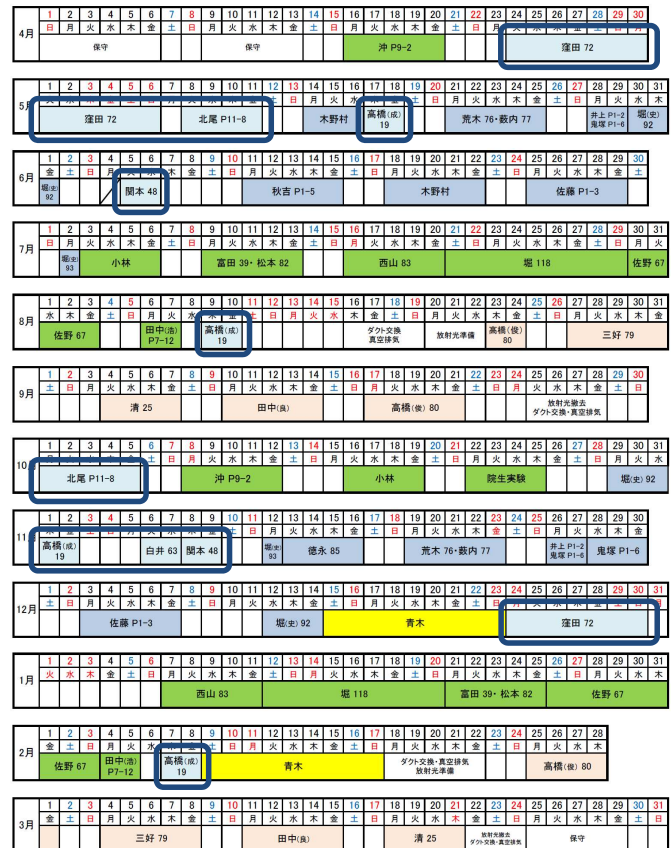
ビーム出射時間の利用分野別割合
2016年度 合計2,638時間



9

マシンタイム

- タイムなスケジュール
- 光量子照射のマシンタイムの増加は厳しい
- 中性子源としての利用(研究炉の停止)
- ビームラインが1本



施設の今後

4月1日～

原子炉実験所 → **複合原子力科学研究所**

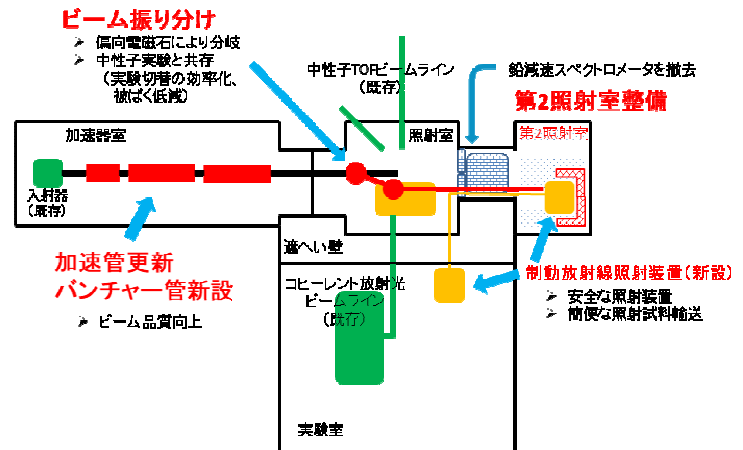
量子ビーム・放射線の複合利用をより強力に推進

電子ライナック

多様な量子ビームを生成でき、研究所の主要装置としての役割はますます重要

- ✓ 電子ライナックはシングルユーザーのマシン
- ✓ マシンタイムは満杯

- ✓ 実験切替の効率化と被ばく低減が課題
- ✓ ビーム品質向上



11

同位体製造

- 中性子照射
 - (n, γ)
 - (n, 2n)
- 光量子照射
 - (γ , n), (γ , 2n)
 - (γ , p)
 - (γ , np)

12

中性子照射

- 同位体製造
 - 最近の実績はなし
 - KURが停止中の利用
- 核データ
 - Anの断面積

13

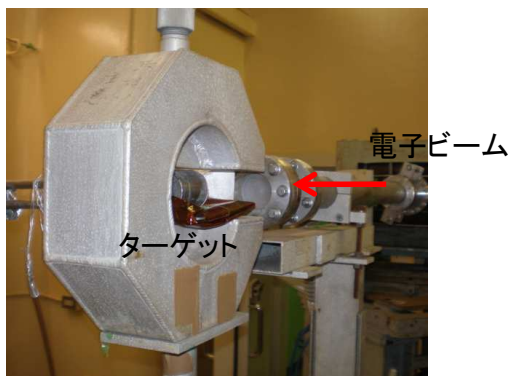
パルス中性子の利用 (ライナック設置当初の主目的)

複合研・堀准教授、佐野助教が担当
(本発表の資料提供)

中性子源

- Taターゲットを使用し(γ, n)反応による高速中性子
→ 軽水モデレータにより白色中性子場
- 30MeVの電子に対して 7.5×10^{-3} n/eの中性子発生量
- 6kW出力時: $\sim 8 \times 10^{12}$ n/s

パックマン型モデレータ



熱外中性子利用
高エネルギー分解能測定(共鳴解析用)

円筒型モデレータ



熱中性子利用
放射化実験用

14

パルス中性子研究内容 (2本の柱)

核データ測定研究

- 熱中性子捕獲断面積の高精度化
- TOF測定に用いるサンプル量の高精度決定技術開発
- 全断面積測定を組み合わせた共鳴パラメータの決定

原子カシステム研究開発事業「マイナーアクチニドの中性子核データ精度向上に係る研究開発」(2013～2017)

非破壊分析研究

- 新たな中性子源開発
- 核種定量技術の高精度化
- 可視化技術の高度化
- 物性値評価方法の高度化(形状・温度)

原子カシステム研究開発事業「次世代原子炉燃料の健全性評価のための非破壊分析技術の開発」(2014～2018)

このほか、検出器開発、放射性エアロゾル測定方法の研究

15

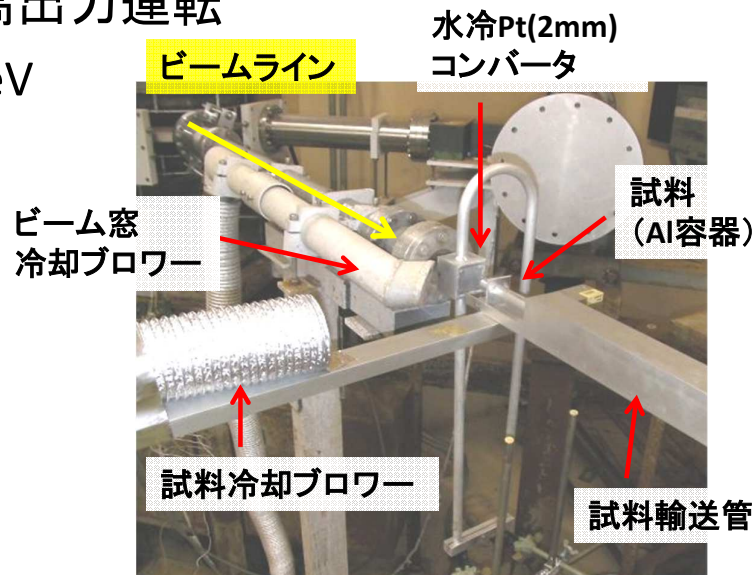
光量子照射

- 核医学
- メスバウアー線源
- 放射性トレーサ
 - キャリアーフリー
 - マクロ量

16

制動放射X線の利用 (RI製造)

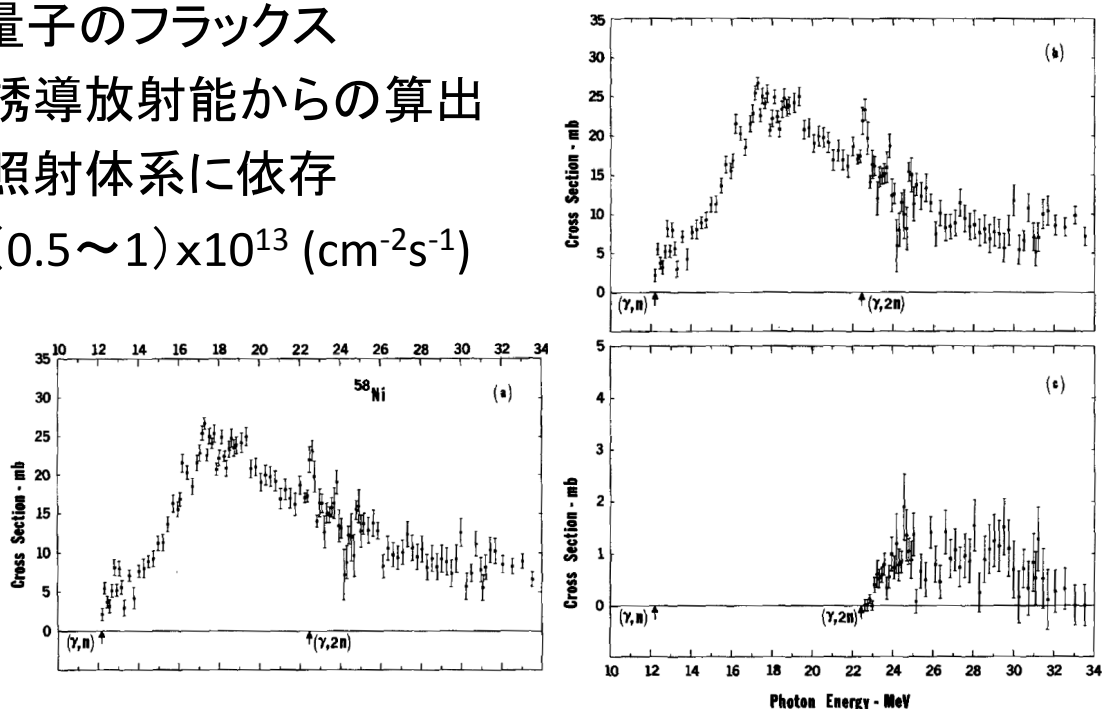
- 運転条件
 - 長パルスモード (4 μ s)
 - 6kW超の高出力運転
 - 30~40 MeV



17

断面積とフラックス

- 光量子のフラックス
 - 誘導放射能からの算出
 - 照射体系に依存
 - $(0.5 \sim 1) \times 10^{13} \text{ (cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$



B. L. BERMAN

ATOMIC DATA AND NUCLEAR DATA TABLES 15, 319-390 (1975)

18

核医学

- 医療用RI
 - PET検査・SPECT検査などの核医学検査やβ線治療に利用されるRI

各医療拠点で必要な時に必要な量が速やかに供給できる態勢を目指した製造技術開発。被ばくリスク低。材料コスト低。

- ^{99}Mo
 - ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ジェネレータ
 - $^{\text{nat}}\text{Mo} (\gamma, n)^{99}\text{Mo}$
 - ^{99}Mo ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)の製造方法と単離手法の開発

19

- ^{18}F
 - ^{18}F の新製造方法の開発
 - $^{20}\text{Ne} (\gamma, np)^{18}\text{F}$
 - $^{20}\text{Ne} (\gamma, 2n)^{18}\text{Ne} (\beta^+)^{18}\text{F}$
- ^{225}Ac (計画段階)
 - アルファ核種
 - ガンの治療薬として有望視
 - $^{226}\text{Ra} (\gamma, n)^{225}\text{Ra} (\beta^-)^{225}\text{Ac}$
 - ただし、現在 ^{226}Ra の許可がない

20

メスバウアー線源

- メスバウアー分光
 - ある特定の元素だけについて電子状態や振動状態の情報を抽出することができる
- メスバウアー線源の供給

短寿命のRIを製造し線源として供給(研究炉、ライナック)

- $^{162}\text{Dy} (\gamma, p) \text{ } ^{161}\text{Tb} (6.88\text{d}) \rightarrow ^{161}\text{Dy} (25.7\text{keV})$
- $^{68}\text{Zn} (\gamma, p) \text{ } ^{67}\text{Cu} (61.8\text{h}) \rightarrow ^{67}\text{Zn} (93.3\text{keV})$
- $^{62}\text{Ni} (\gamma, p) \text{ } ^{61}\text{Co} (1.65\text{h}) \rightarrow ^{61}\text{Ni} (67.4\text{keV})$

21

放射性トレーサ

- キャリアフリー
 - 安定同位体の希釈を受けない
 - $(\gamma, p), (\gamma, n) \rightarrow (\beta^+ \text{ or EC})$
 - 精製処理を行う
- マクロ量
 - 安定同位体の希釈を受ける
 - $(\gamma, n), (\gamma, 2n)$

22

- 長半減期核種の環境動態
 - Zr (γ, n) ^{89}Zr (3.3d), ^{95}Zr (64d)
 - ^{93}Zr ($1.6 \times 10^6\text{y}$)
 - Pd (γ, n) ^{103}Pd (17d)
 - ^{107}Pd ($6.5 \times 10^6\text{y}$)
- 原発事故時に放出される核種の環境動態
 - ^{106}Cd (γ, n) ^{105}Cd (β^+ or EC) ^{105}Ag (41.3d)
 - $^{110\text{m}}\text{Ag}$ (250d)
 - Ba (γ, p) ^{134}Cs , ^{135}Cs ($2.3 \times 10^6\text{y}$), ^{136}Cs (13.2d), ^{137}Cs
 - Ca (γ, p) ^{43}K (22.3h)

23

電子ライナックによる同位体製造について

- 製造のチャンネル
 - 研究炉と同じ中性子照射
 - 研究炉とは異なる光量子照射
- 研究炉の廃止後
 - 新規の研究炉設置は困難
 - 加速器駆動による照射場
 - 電子、陽子、重陽子、その他
- 加速器に必要なスペック(電子ライナック)
 - 加速エネルギーは50MeVで十分(?)
 - パワー: 複合研LINAC (10kW)
 実用機 (50kW以上)(?) (数mA)

24

- 試料の取り扱い
 - 放射化学実験室
 - 核燃料やアルファ核種
 - 短半減期核種
- 被ばく量の低減
 - KURNS-LINAC: $\sim 300\mu\text{Sv/h}$