

# 21世紀は「光」の世紀

日本原子力研究所

関西研究所

田島 俊樹

## 原子力委員会殿からの検討依頼事項

①自らが関わっている分野についての現状、他の加速器分野に比した新規性、将来展望、国際競争・分担等について



(当該分野の新規性、展望、国際的位置などについて、レクチャーの中で特に強調して触れる)。

②我が国が当該分野を国際的に主導する能力、メリット



当所は、レーザー開発(コンパクト高強度レーザー、ERL-FEL、X線レーザー)で世界での主導的役割りを演ずる。(この点についてもレクチャーの中で強調して触れる)。

③国立大学の独法化を踏まえ、大学での中・小型加速器を使用した研究、教育をどう進めるべきか(後継者育成)



小型で利用の種類の多いレーザー駆動の様々な加速器要素は、新しい加速器科学や技術を刺激する。新しい広い産業への利用の広がりがあるので、加速器の後継者育成に良いトレーニングになる。

④(大型加速器を用いた研究の)研究資金(例:一般の競争的資金の中で勝ち取る、あるいは加速器の公募型研究等が必要か)



一般の競争的資金の中で勝ち取るのが本道である。

⑤産業界と大学等の研究者とのインターフェイスを改善し、新製品へと繋ぐためにはどうすべきか(産業界と研究者のペースの違いをどう克服するか)



出口に向けた(或は出口から遡った)研究開発を進めることが、言いふるされた常識だが、それ以上でも以下でもない。加速器の場合特に、seeds側とneeds側が手を取り合って共同することが本質的である。

⑥国または国の研究開発機関(原子力新法人、KEKなど)に期待すること



我々自身原子力新法人になって行くが、原子力の革新的推進にはレーザーや加速器が重要な役割を果たすので、この研究を発展させることが重要である。原子力研究から発生したレーザー技術や加速器技術は高エネルギー加速器の要素技術となって行くであろうし、その逆もあるであろう。(この点についてもレクチャー中で触れる)。

# 目 次

## 1. はじめに: レーザーの最近の歩み

## 2. レーザー加速の現状と将来

- ・レーザー加速: 電子加速とその応用
- ・レーザー駆動イオン源

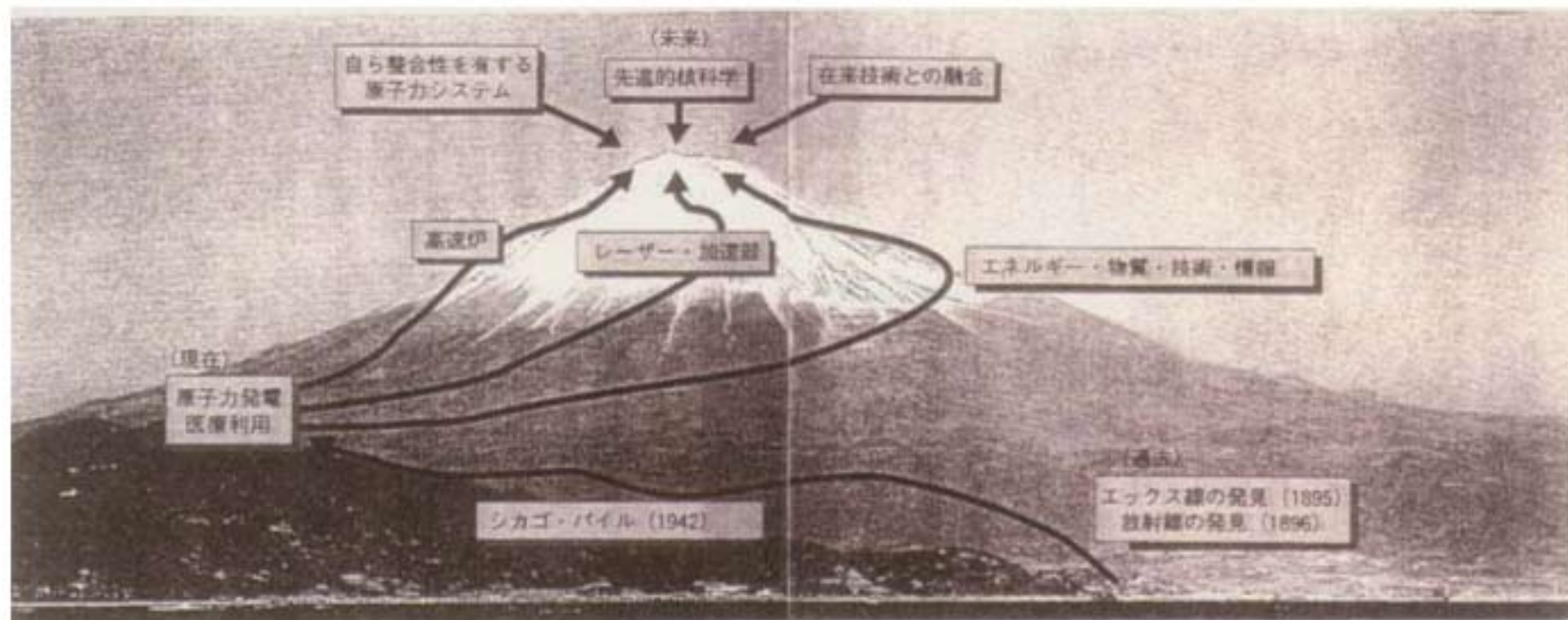
## 3. 自由電子レーザーとエネルギー回収型放射光源

- ・放射光における関西研の使命
- ・原研における自由電子レーザー技術(FEL技術)

## 4. レーザー技術と加速器技術の掛け合せ

- ・レーザー技術と加速器技術
- ・レーザーと電子線の掛け合わせ
- ・相対論工学

## 藤家原子力委員長の理念

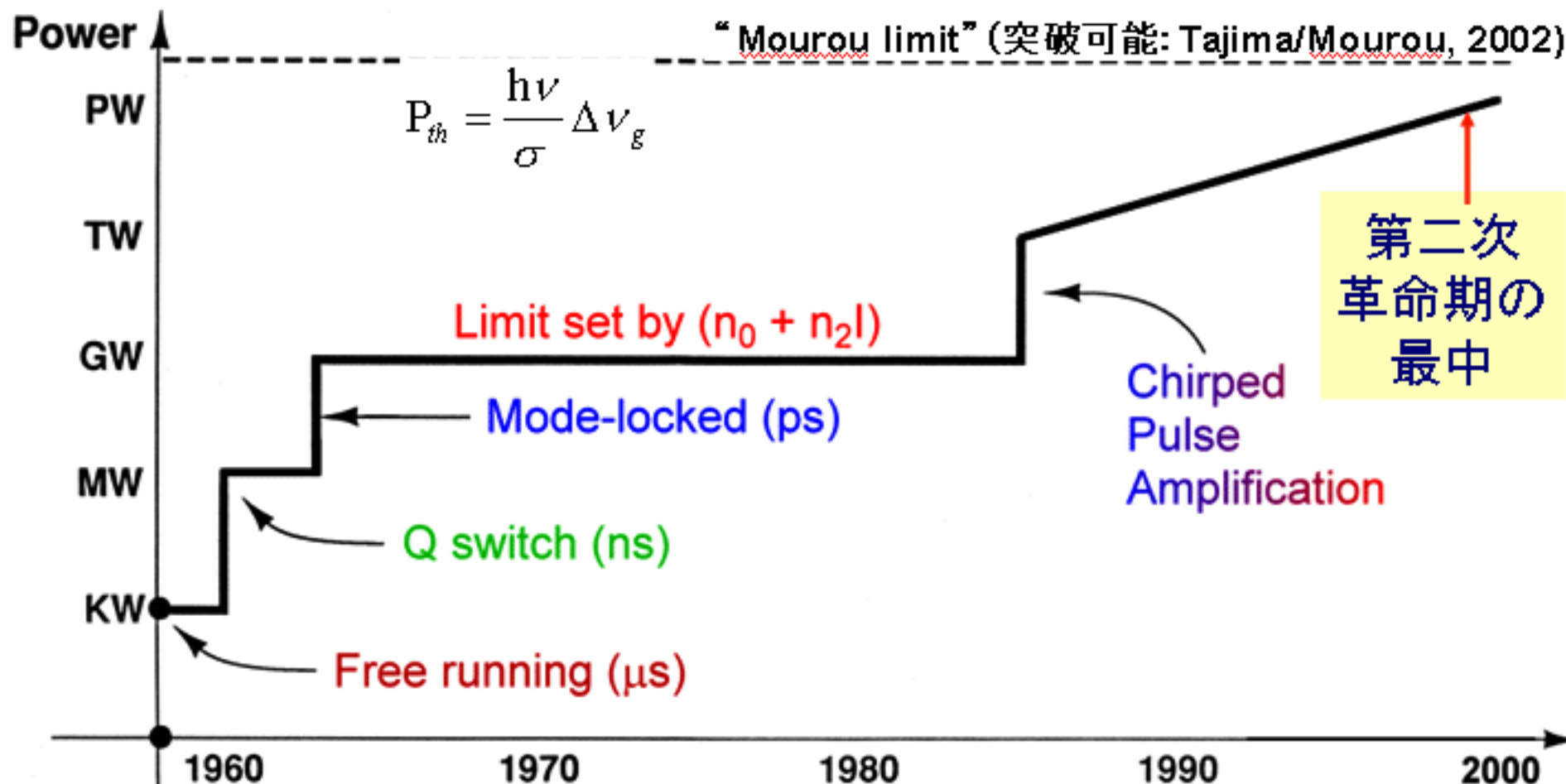


藤家洋一著「リサイクル文明が求める原子力」より

- ・原子力の革新的展開を図るために総合的科学技术の動員が必要
- ・光科学は21世紀における主導的キーテクノロジーである

# 90年代のレーザーの革命とレーザー科学の展開

ビーム1cm<sup>2</sup>  
当たりのパワー

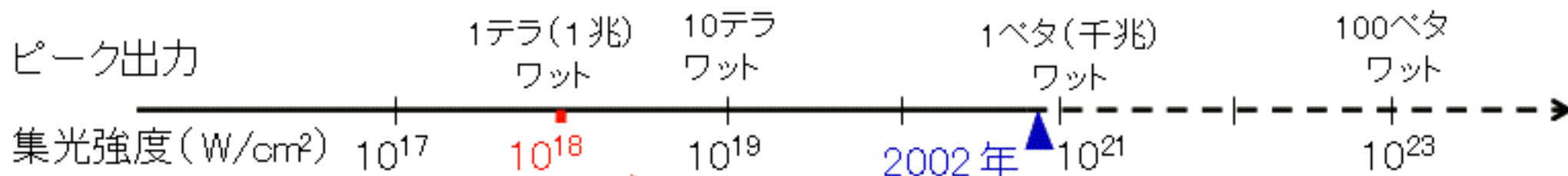


高強度、小型、高繰り返し、超短パルス、  
高コントラスト、パルス型制御性





# 超高強度レーザー光：高性能放射線の生成



## 高強度光場における電子の運動

電子に働く力

$$\mathbf{F} = e \left[ \mathbf{E} + \frac{\mathbf{v}}{c} \times \mathbf{B} \right]$$

レーザー強度と電子運動の軌跡

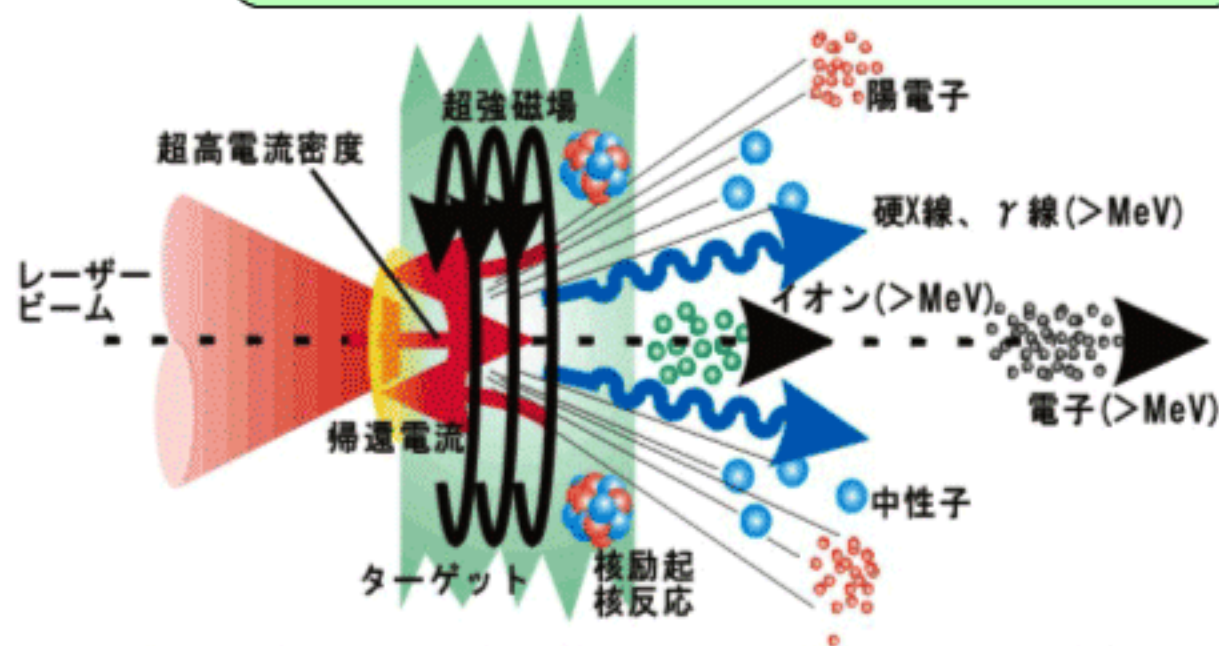


~10<sup>18</sup> W/cm<sup>2</sup>

<<10<sup>18</sup> W/cm<sup>2</sup>    >> 10<sup>18</sup> W/cm<sup>2</sup>

## 特徴的現象

クーロン爆発、プラズマ波電子加速、制動放射、光電離、電子衝突内殻励起、光核励起



X線

電子、陽子、イオン

硬X線

陽電子、中性子

γ線

短パルス、高輝度、高エネルギー、高コヒーレント

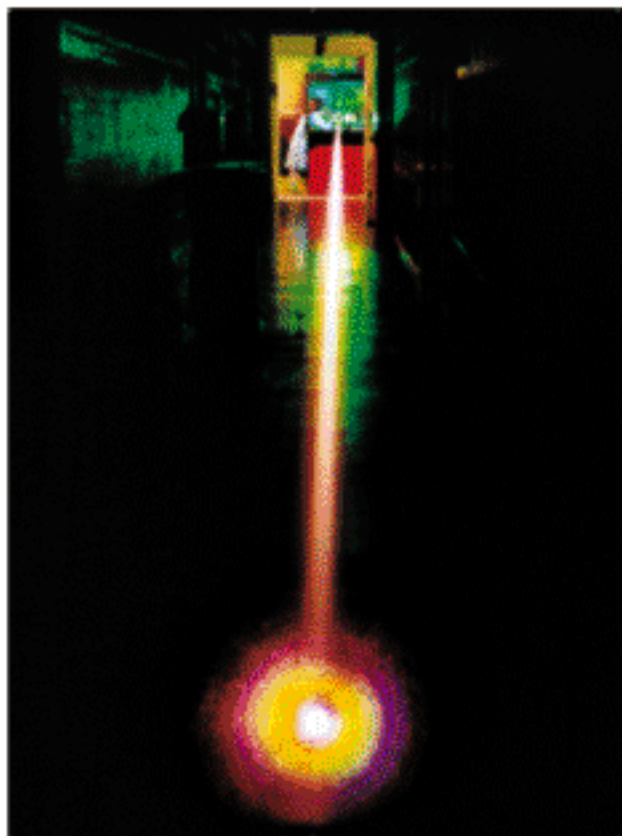




# 高強度領域:レーザーパルスの自己組織化

中性ガスに伝播するレーザーの非線形  
分極自己集束

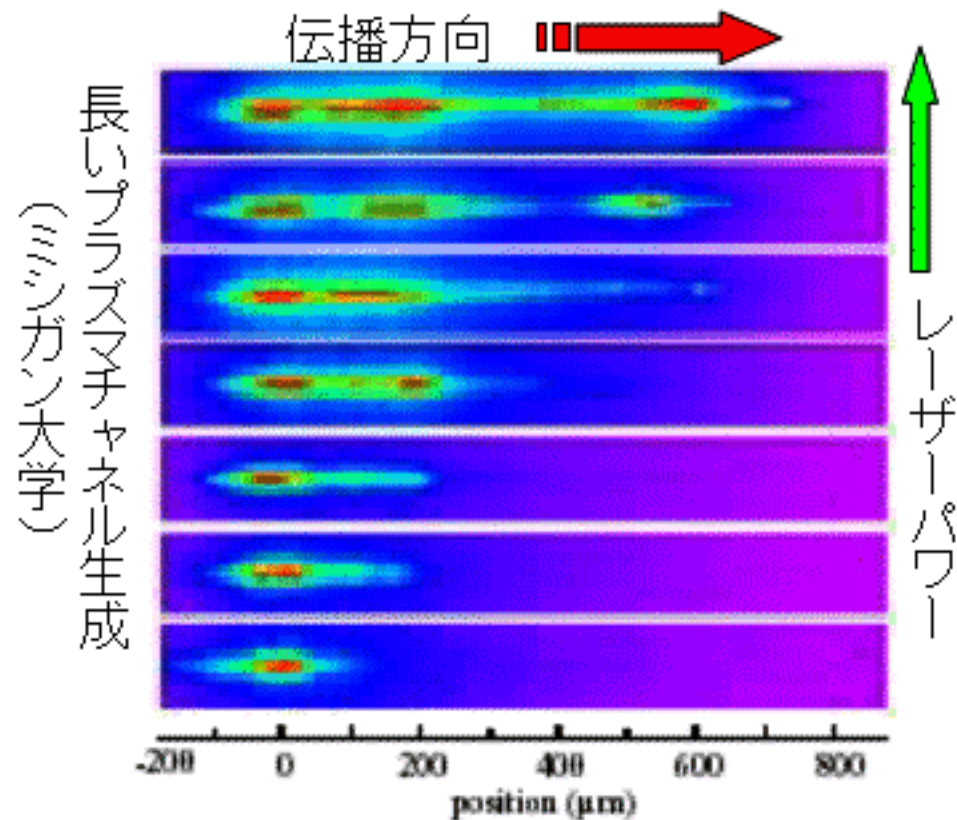
レーザーファイラメント20メートル  
(ミシガン大学)



長距離伝播の最適条件

- 1) パルスの弱集光
- 2) 負の周波数チャープ

高強度レーザーの相対論的  
自己集束



長距離伝播の最適条件

レーザースポットを  
プラズマ波長より小さく選択

# 原研の高強度小型レーザー開発

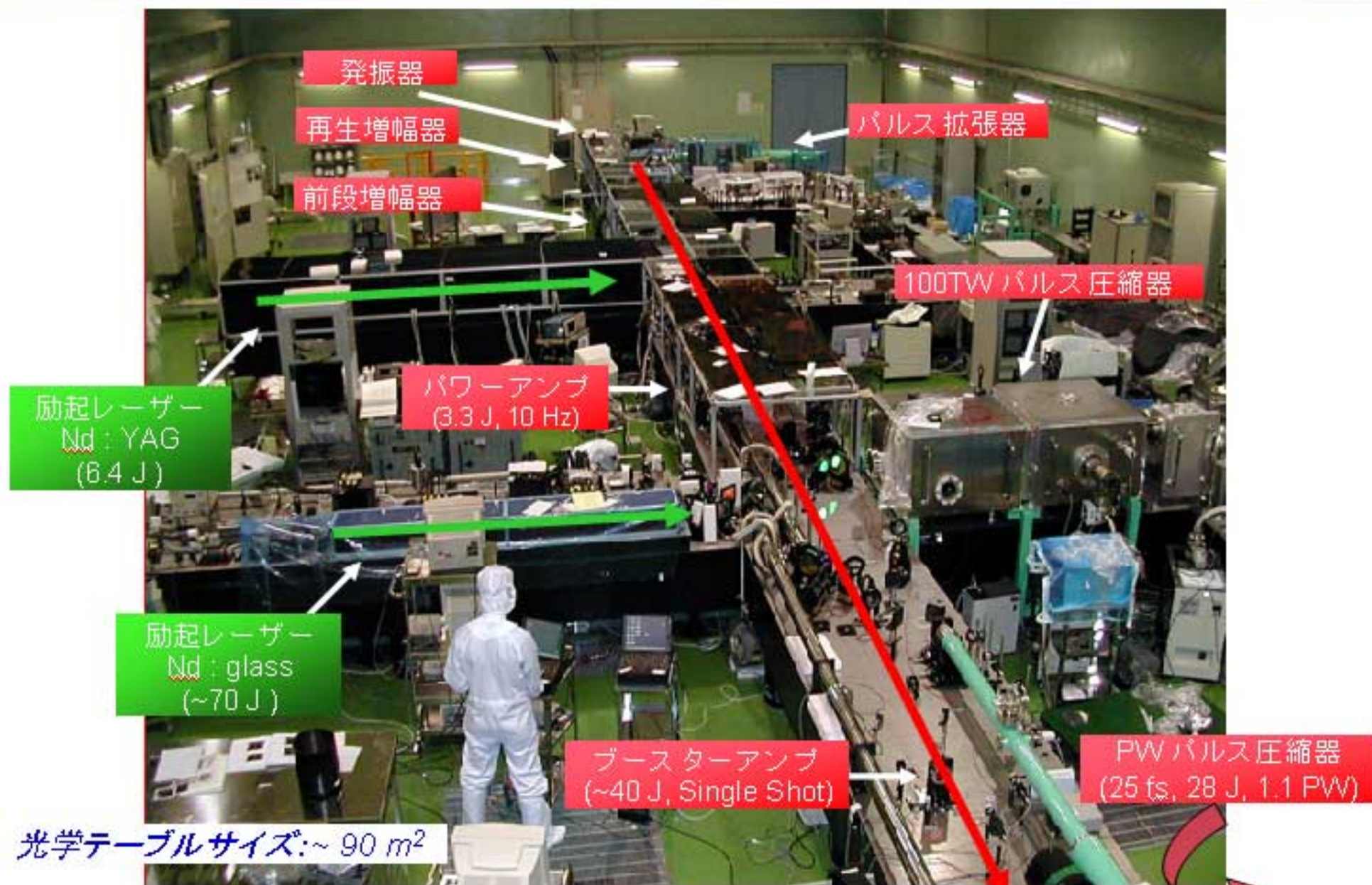
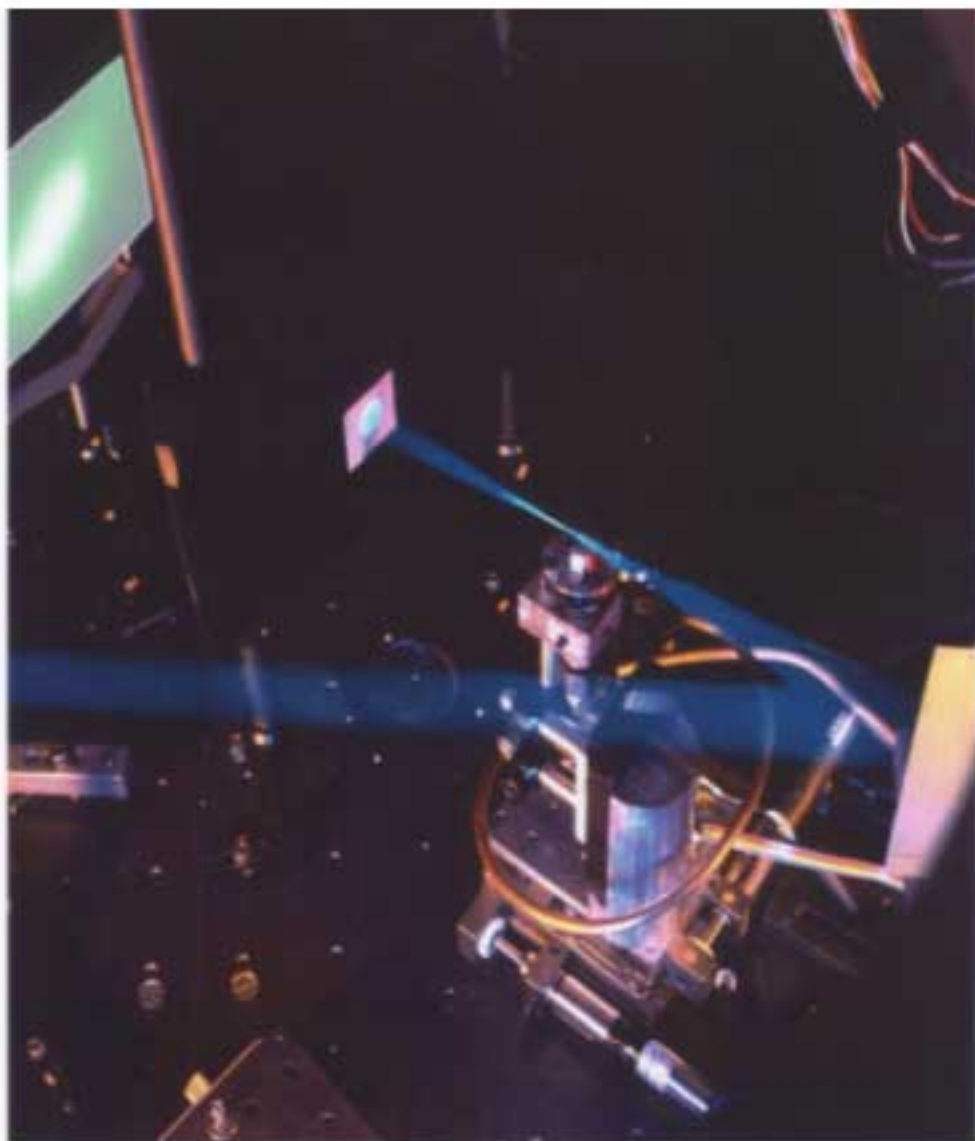
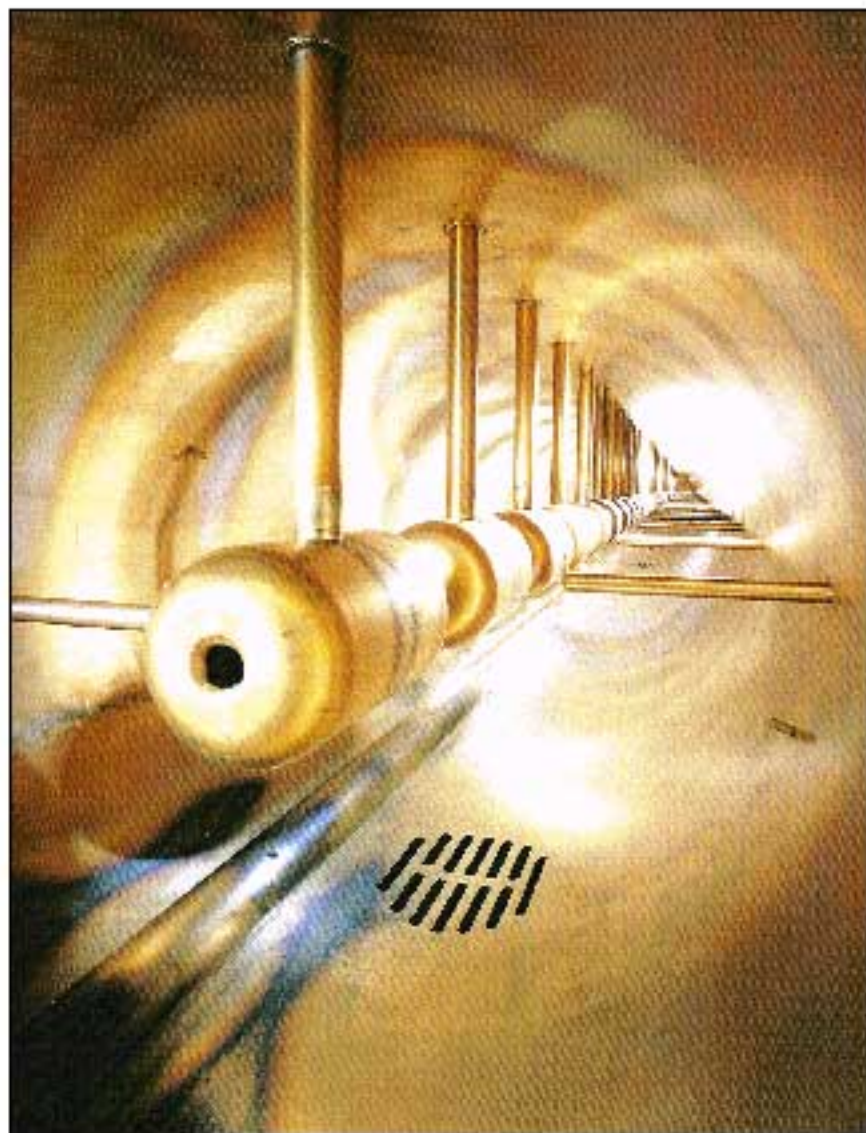


Table-Top Terawatt (T<sup>3</sup>: Tキューブレーザー)

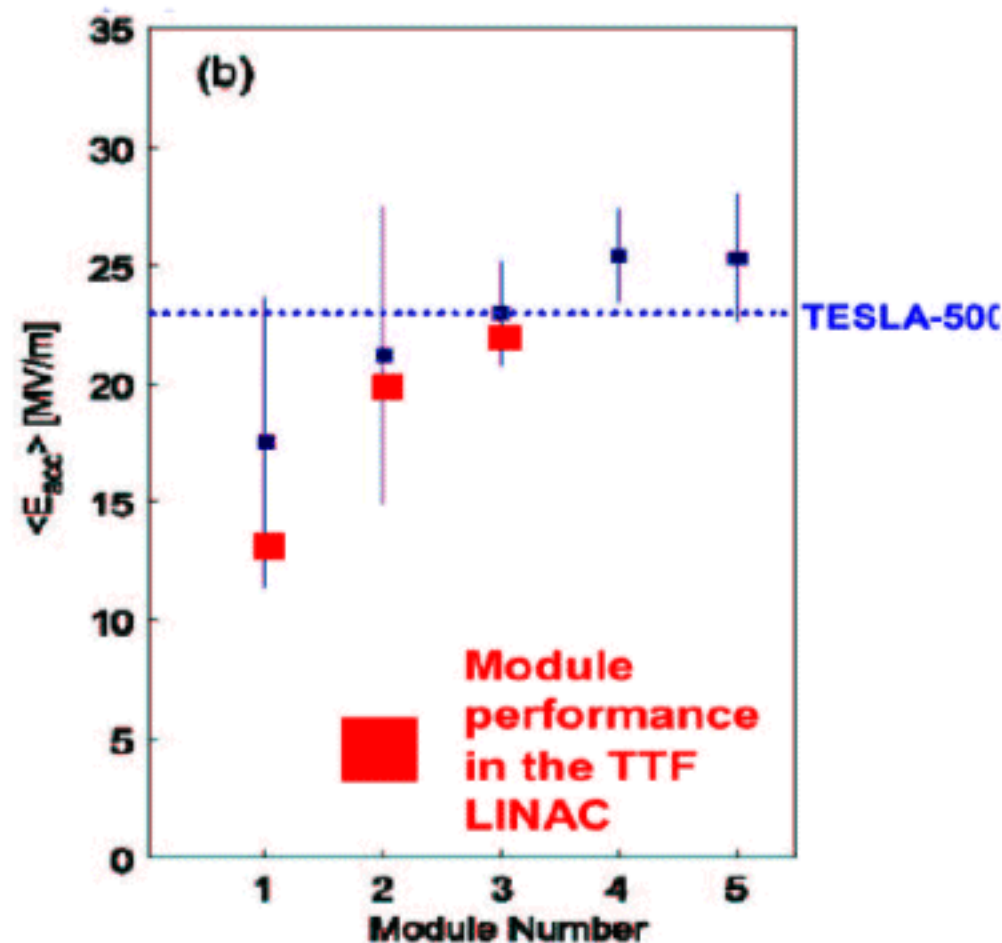
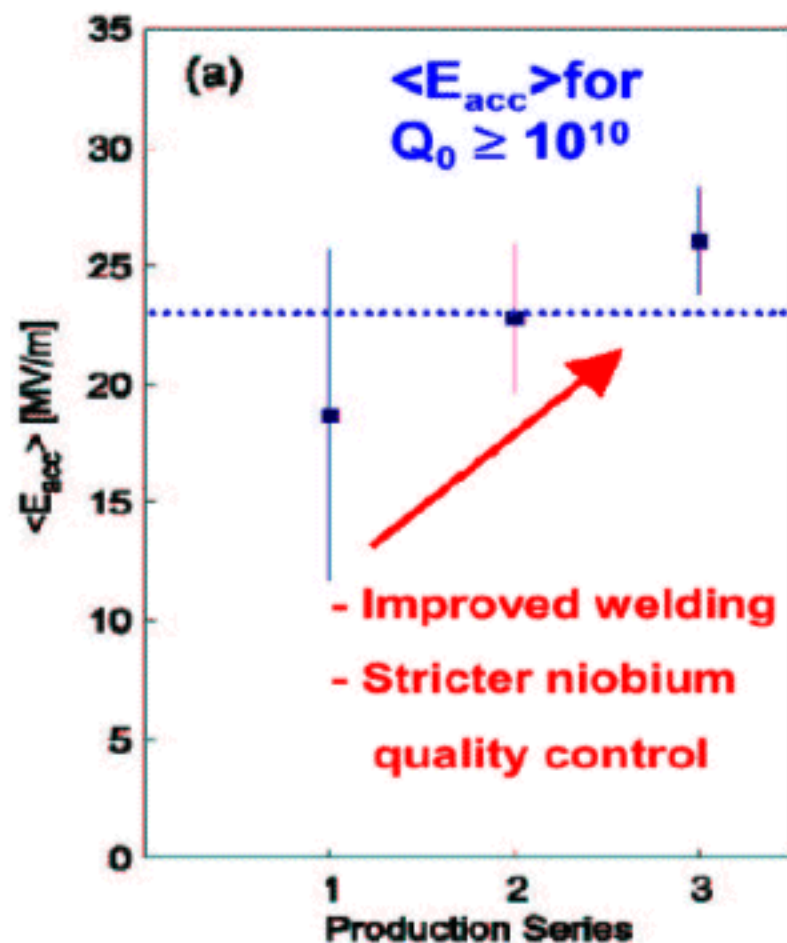
高強度レーザー光



# *Particle Accelerators*

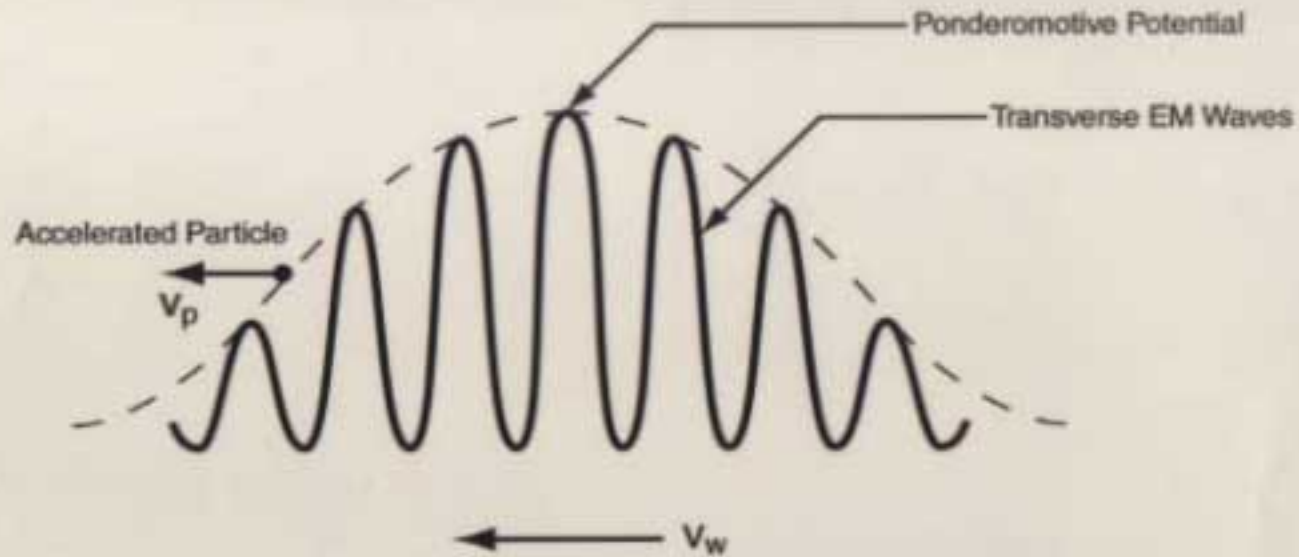


# Gradient Achievement!



Yield with  $E_{acc} > 23$  MV/m in 3<sup>rd</sup> production are  $\sim 90\%$

## Ponderomotive Acceleration By $\perp$ M Waves



10-0001  
8617A2

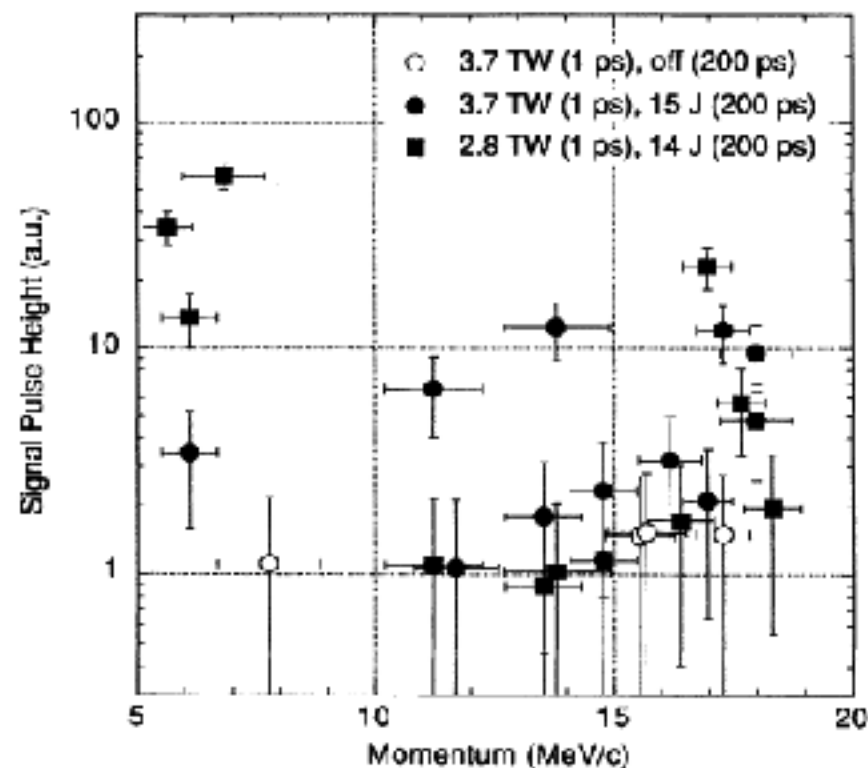
Dolphins Surf Wave



# レーザー・プラズマ加速法の歴史

レーザー加速による電子加速  
(自己変調レーザー航跡場加速)

K Nakajima et al., 1995



(十分に短くないパルスの)レーザー:  
自己変調による航跡場共鳴条件の充足

ビーム航跡場加速による電子加速

A Ogata et al., 1995

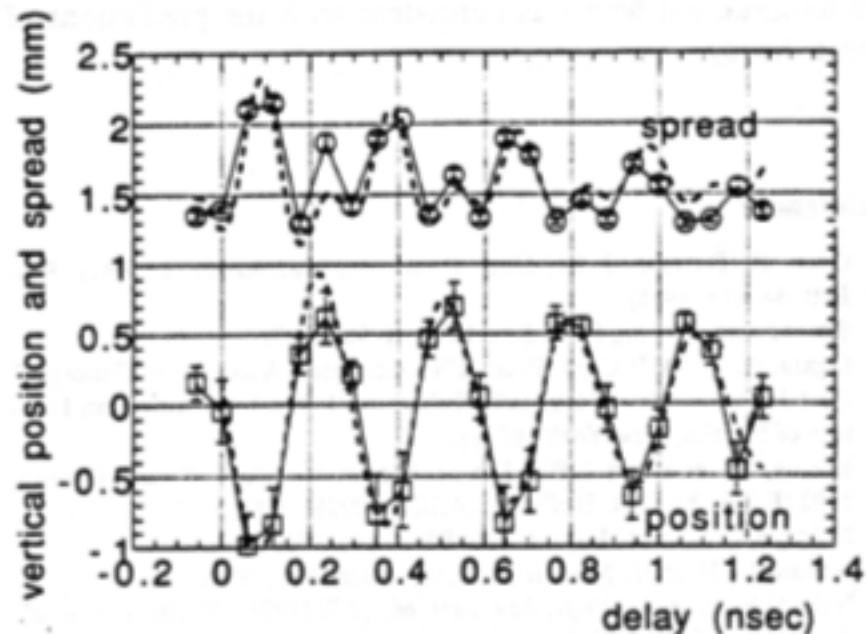


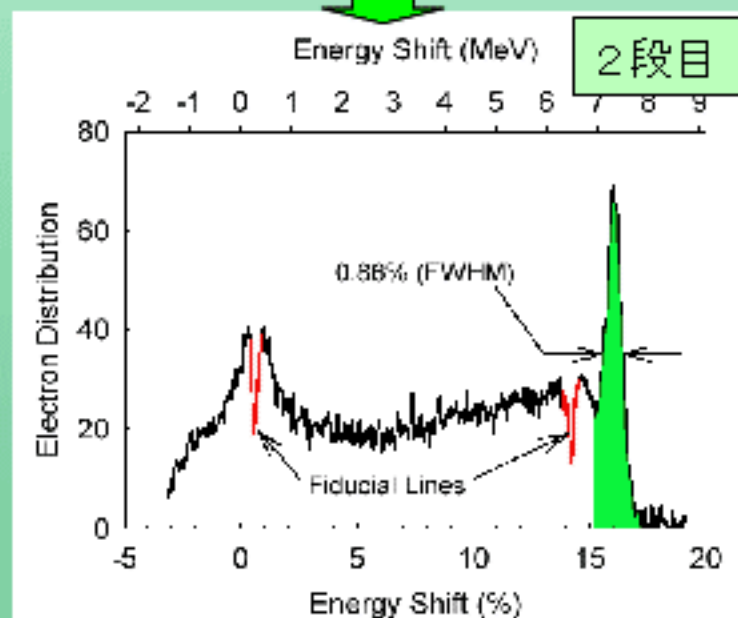
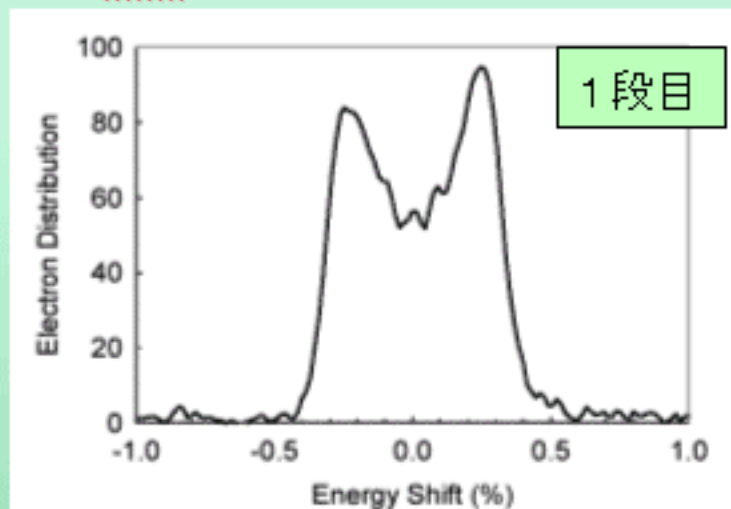
Fig. 4. Delay dependence of the vertical position and spread.

航跡場の2次元の(楕円)構造観測

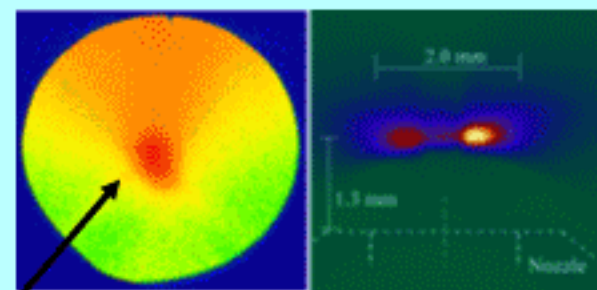
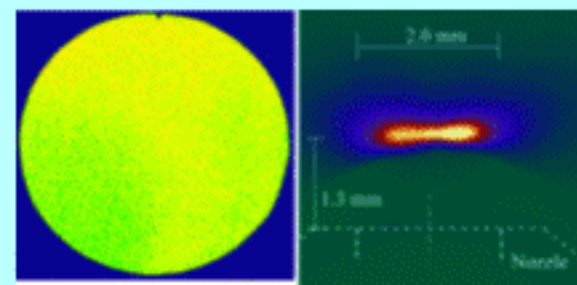


# レーザー加速の最近の進歩

レーザー2段加速によるエネルギー分布  
の尖頭化(W. Kimura 2003)



光入射法による実験~プリパルスによる入射  
(T. Hosokai 2003)



電子ビーム

エミッタンス  $0.1 \pi \text{ mm-mrad}$

# 原研関西研でのレーザー加速研究の取り組み

## プラズマカソード

シングルパルス方式  $E > 200 \text{ MeV}$

衝突パルス方式  $\varepsilon \sim 0.1 \text{ } \mu\text{mm-mrad}$

$\Delta E = 0.7 \%$

## 航跡場加速

$L = 1 \text{ cm}$ ,  $E = 1 \text{ GeV}$

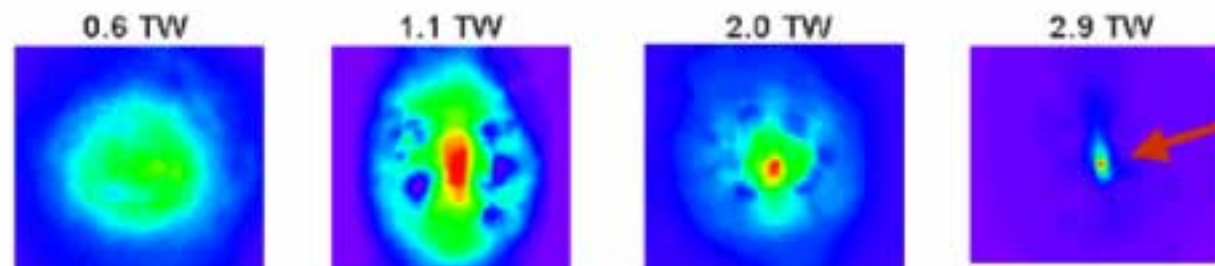
## レーザー加速の実証から高度化へ

高エネルギー化	高出力レーザー (100 TW)	1 GeV@ 5mm
	導波路による長距離化	> 2 GeV@ 5 cm
高品質化	高品質電子入射によるビーム整合	加速エネルギーの狭帯化
	バンチスライス	
衝突型プラズマカソード方式		$\varepsilon < 0.1 \text{ } \mu\text{mm-mrad}$ $\Delta E/E < 1 \%$



(高エネルギー加速器の研究所への技術伝搬)

# What Was Observed in Plasma Physics?



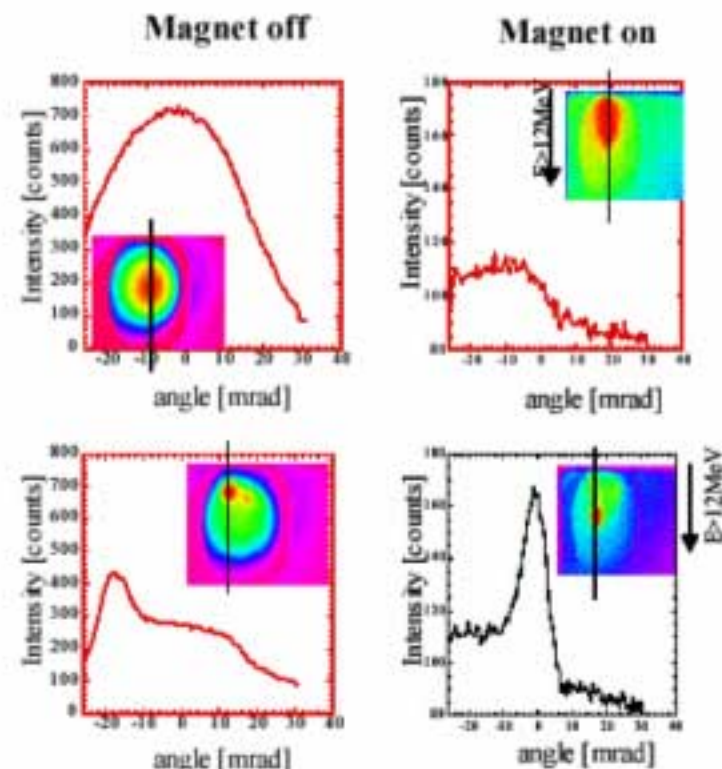
1° divergence, interpreted as  
0.06  $\pi$  mm mrad invariant  
emittance

Michigan:  
Phys. Plasmas 6  
(1999) 4739

## Fact:

High Power Lasers, on interacting  
with matter, produce narrow  
beams of relativistic electrons, but  
with large energy spread  
(~100%)

Berkeley:  
Phys. Plasmas 8  
(2001) 4739



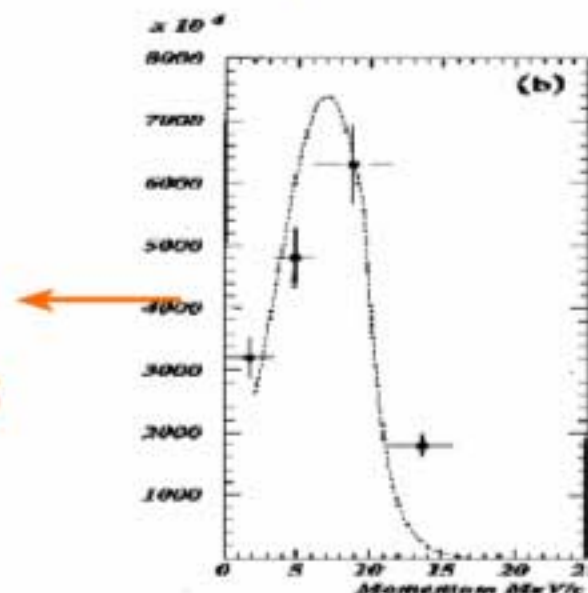
## Correlation Free Emittance Assumed

From the  $5\mu\text{m}$  radius plasma channel size and the divergence, one can calculate  $\gamma\epsilon$ .

This calculation is correct if there are no non-linear space charge effects.

Comparison between two UMichigan experiments give low apparent envelope emittances  $\epsilon_{12}$  for both. Both used 4-5TW lasers with 400 fs ( $120\mu\text{m}$ ) pulse length on a gas jet. The main difference is the centroid collimation used in the second experiment.

Meas./Coll. divergence /mrad	10	2.5
$N_e$	$10^{10}$	$5 \cdot 10^8$
Avg Energy/MeV	2	7
Energy spread	1	3
Laser/Plasma spot size/ $\mu\text{m}$	9/5	14/8.5
$\gamma\epsilon_{12}/10^{-6} \pi \text{ m rad}$	<u>0.06</u>	<u>0.3</u>



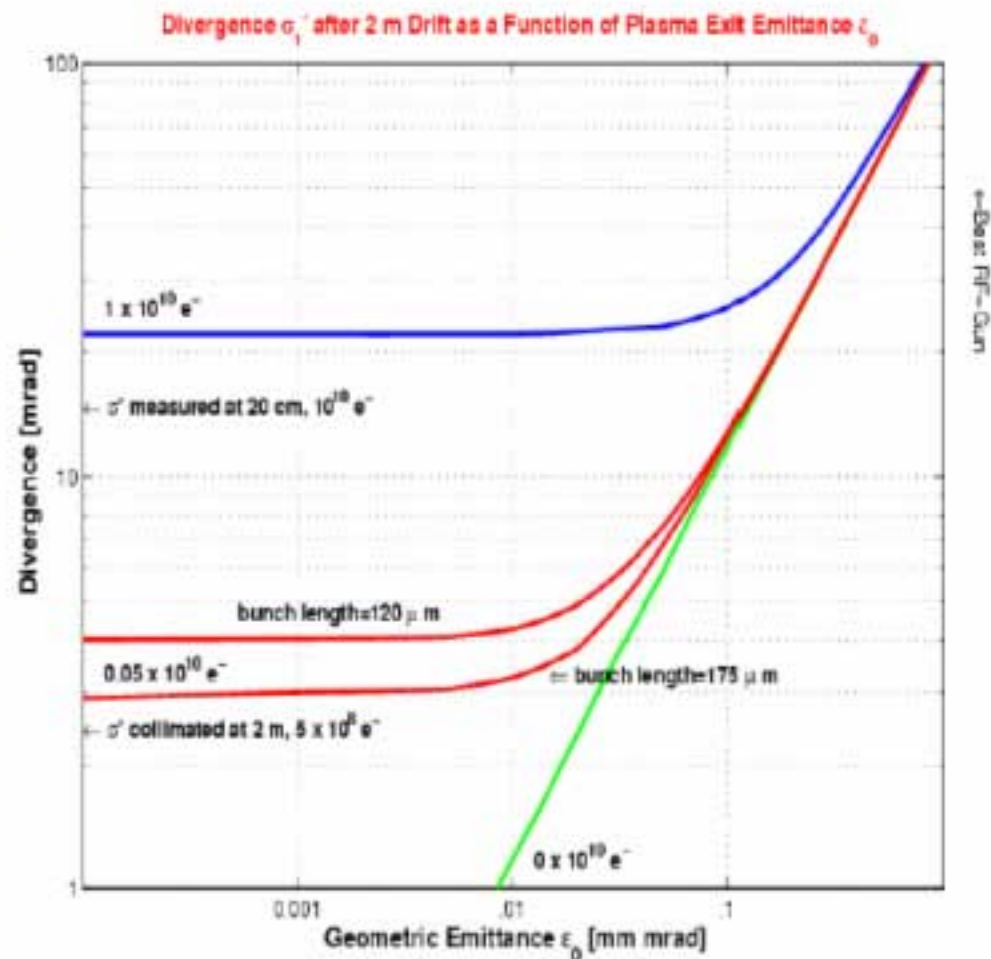
Rainer Pittman



# Divergence as a Function of Exit Emittance $\epsilon_0$

The flat dependence gives an **upper limit** on the emittance  $\epsilon_0$ ,  $< \approx 10^{-8} \pi$  m rad. That is to say, the emittance could be smaller, but we can not determine it from the data.

Since the  $5 \cdot 10^8$  case is due to collimation, we conclude that the original beam of  $2.6 \cdot 10^{11}$  did undergo more rapid expansion. A bunch length of  $250 \mu\text{m}$  would yield a  $\sigma'$  consistent with the collimator parameters.



# Reduce Energy Spread: Several Lasers

## First Proposal: Use Two (LILAC)

### Laser Injected Laser Accelerator (LILAC):

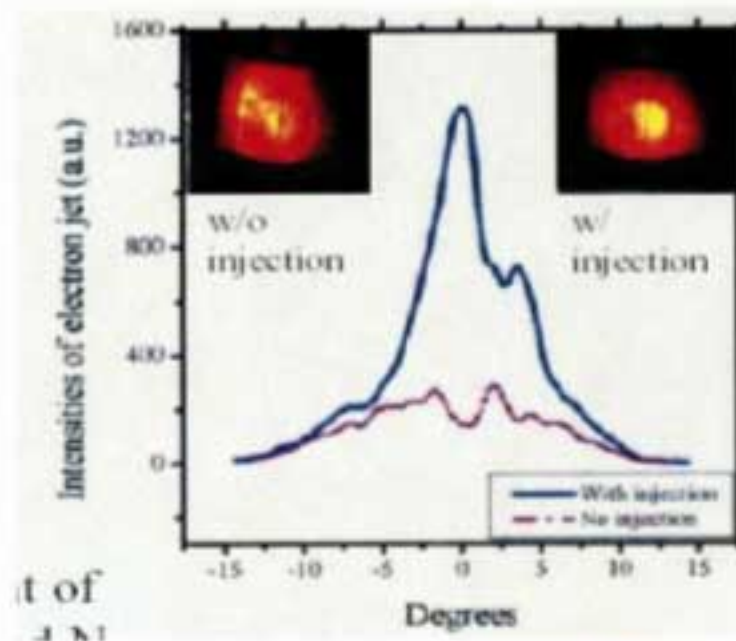
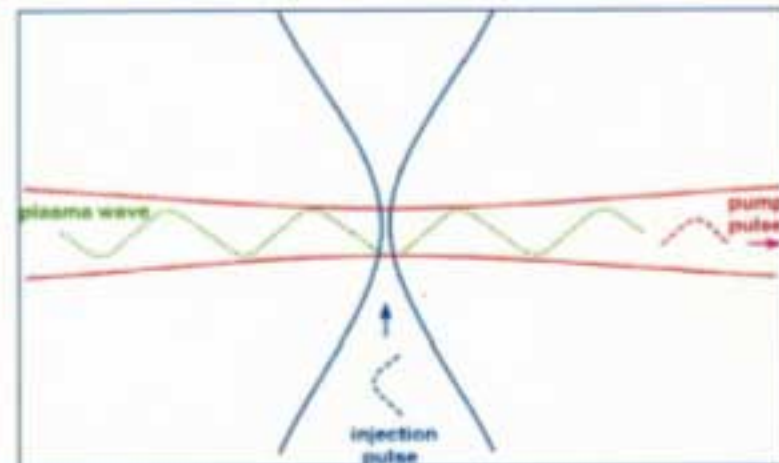
PRL 76(1996) 2073

One Laser produces the Plasma.

A second laser beam intersects and accelerates.

Simulations from UMich give typically (there is wide variation in possible parameter space):

Power (pump)	$\approx 15\text{TW}$
$E$	$\approx 40\text{MeV}$
$\Delta E/E$	$\approx 1.25\%$ (500keV)
$\tau$	$\approx 5\text{ fs}$
$N$	$\approx 10^8$ (one bucket)
$\gamma\epsilon_{\perp}$	$< 1\text{ mm mrad}$
$\epsilon_{\parallel}$	$\approx 2.5 \cdot 10^{-9}\text{ eV sec}$



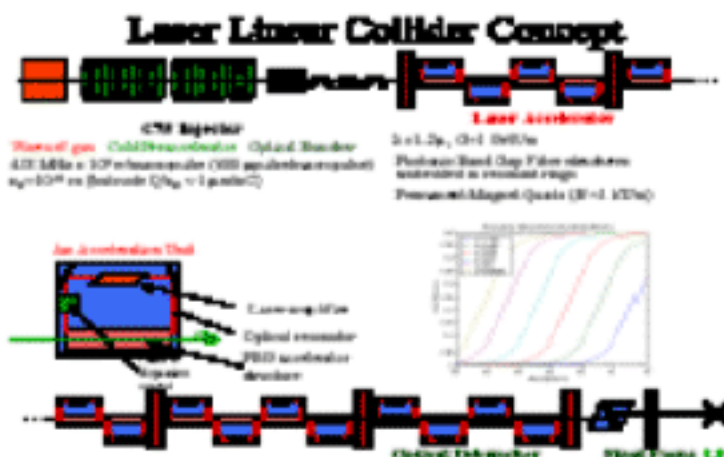
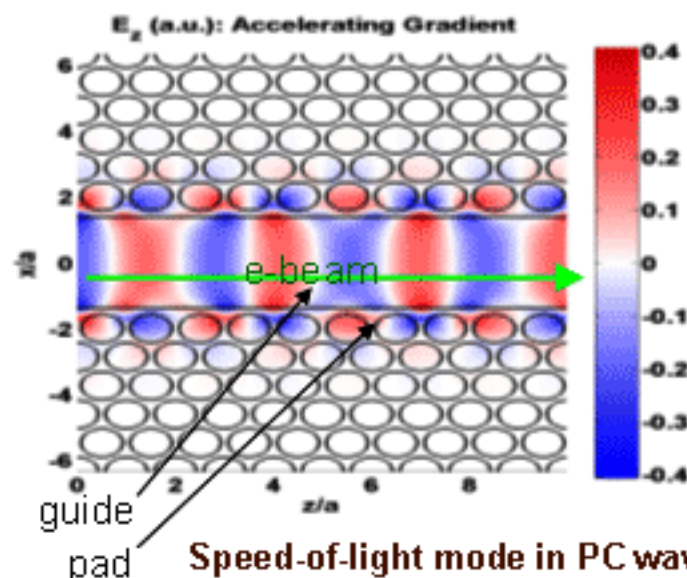
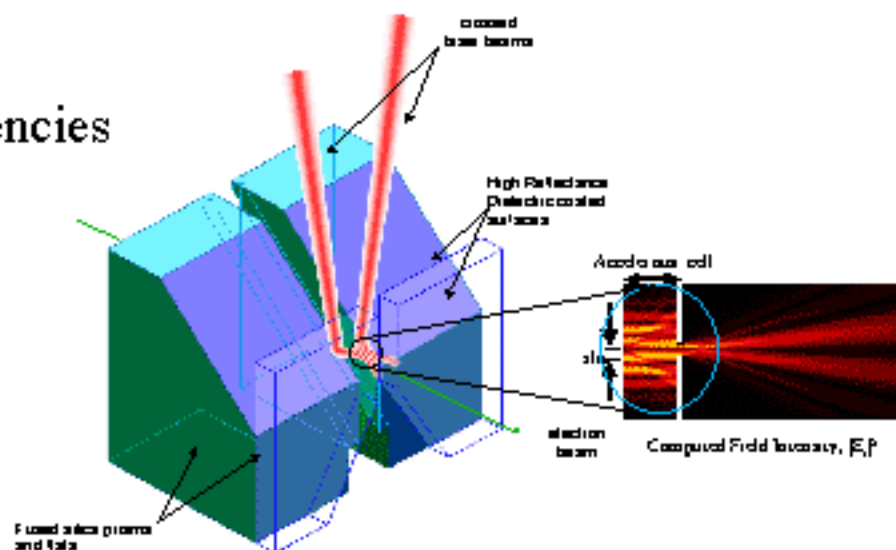




# Phase I: Laser Acceleration

## Scientific Goals:

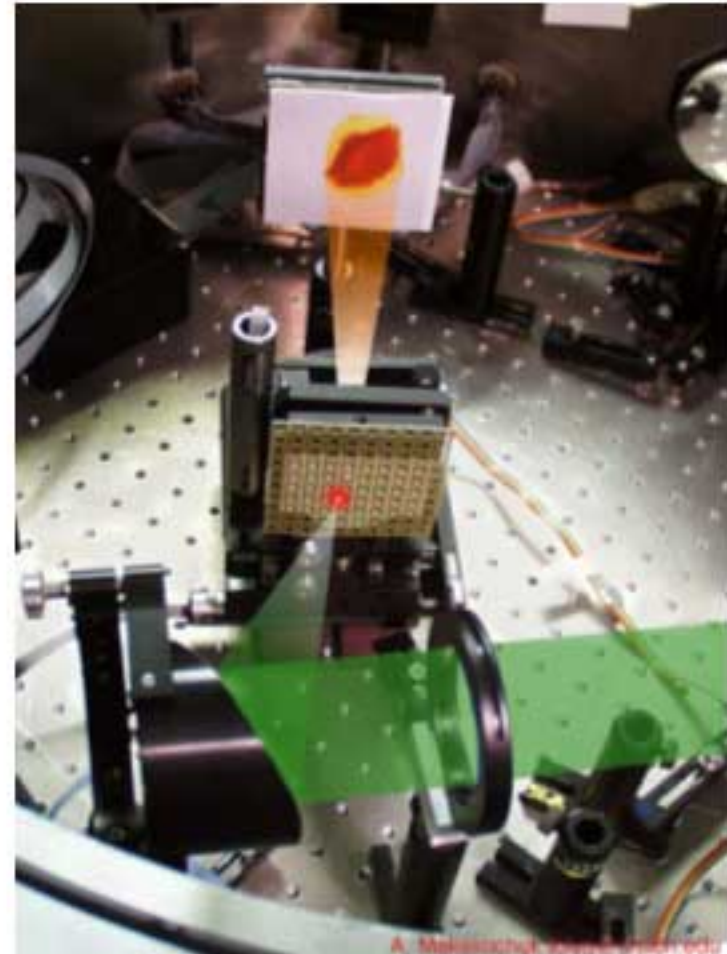
- Thoroughly characterize the dependencies of the energy modulation on:
  - Interaction length
  - Crossing angle
  - Slit width
  - Relative laser phase
  - Physical tolerances of the cell



# *Traditional and Table Top Ion Accelerators*

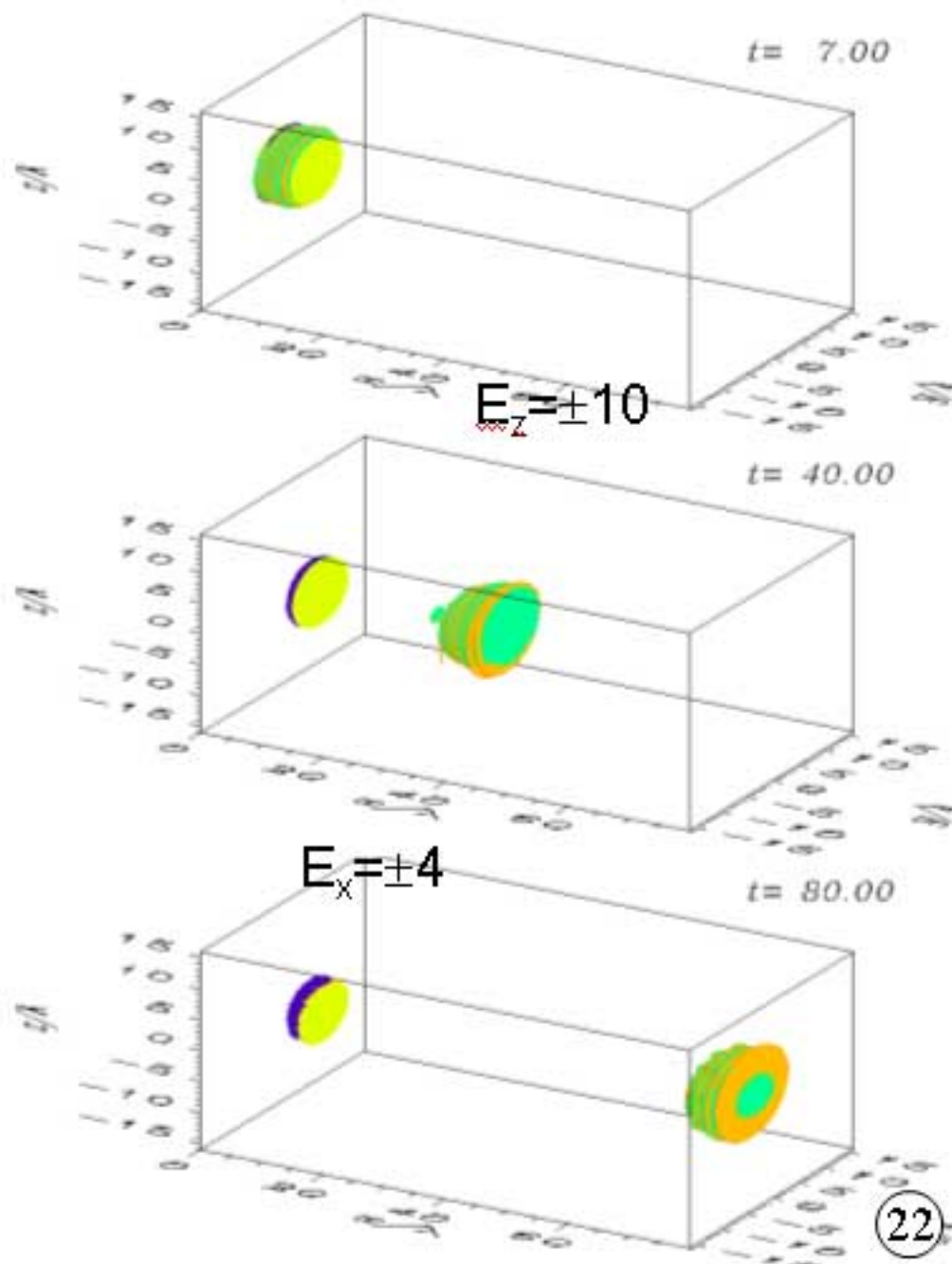
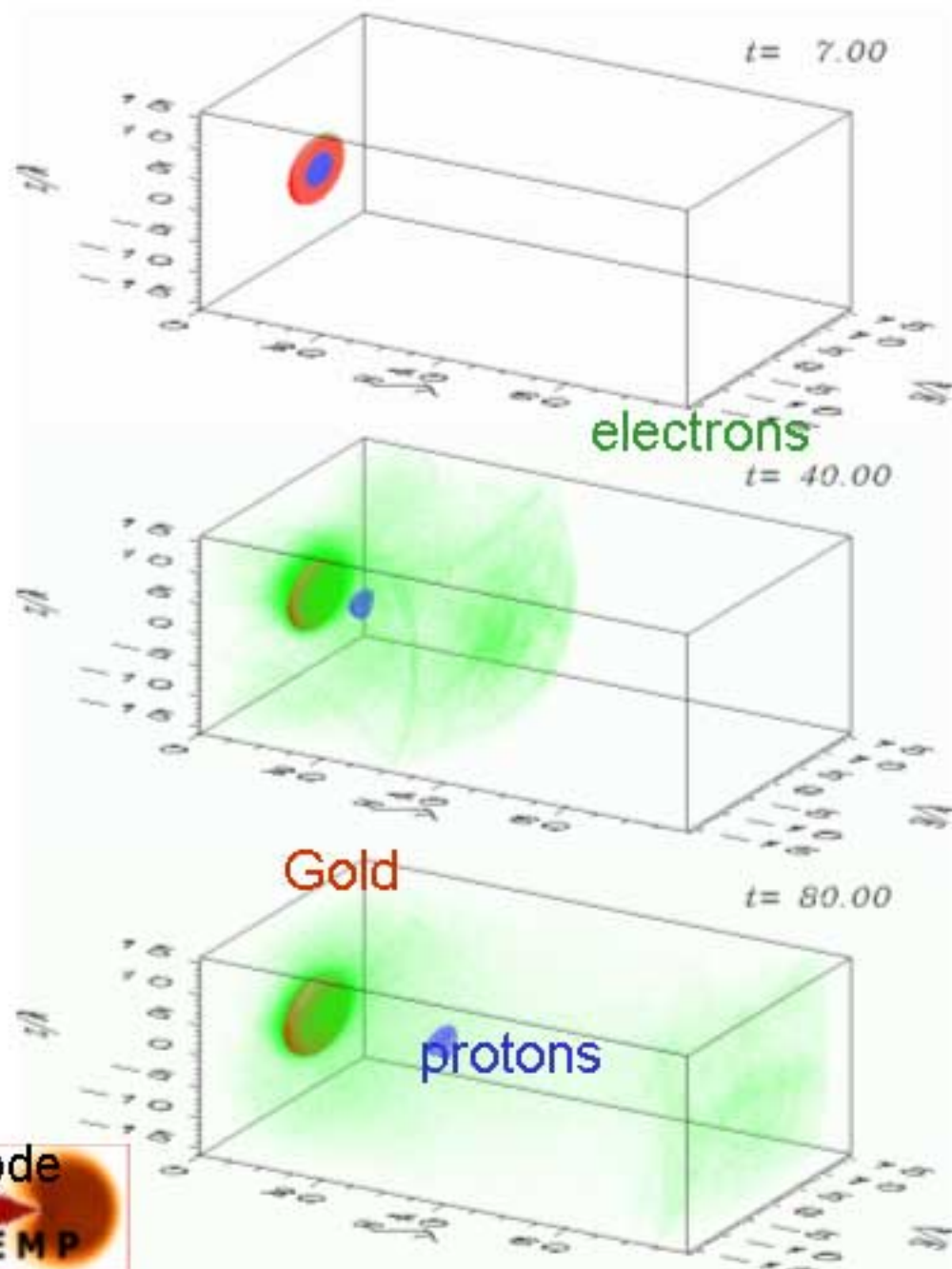


Superconducting cyclotron  
K-500 at MSU



High-intensity laser driven  
proton accelerator at CUOS

# 単色エネルギー陽子加速の可能性





— その利用  
(「使い切る」;BLの整備)

— その高度化への貢献  
(~10年)

— 汎用性のある将来光源の探索  
(独創的光源の自力による開発)

物質科学への利用

【例】 自動車触媒の機構解明

fs Time-resolved (ex. Laser pump/probe)

fs Time-modulated

boosted energy ( $\gamma$  rays) (3.5世代?)

Energy = 16.5 MeV

Bunch charge = 510 pC

Bunch length < 5 ps

Bunch rep. = 10.4 MHz

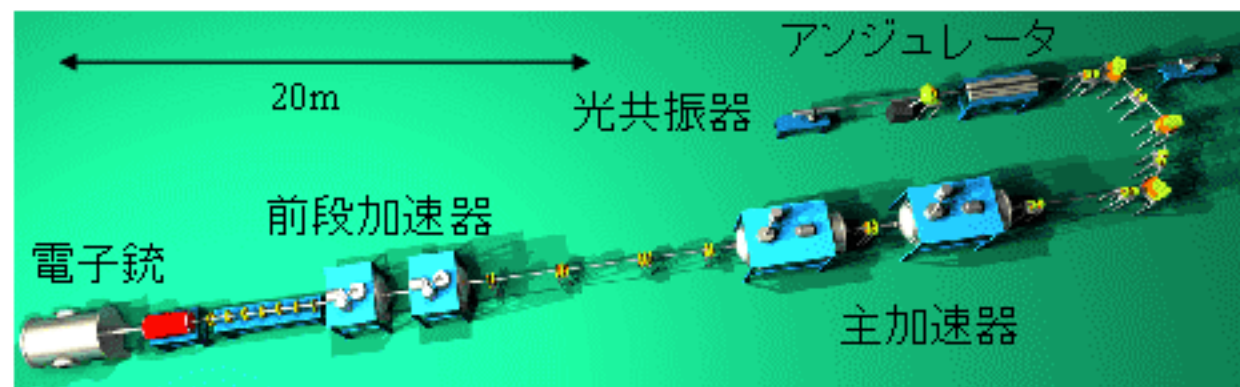
Timing jitter < 100 fs

FEL :  $\lambda = 7-23 \mu\text{m}$

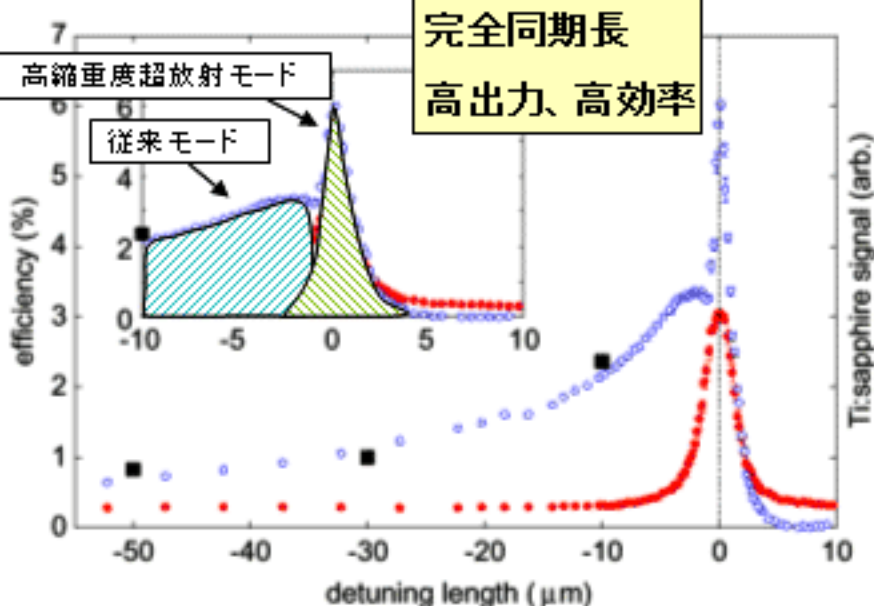
高利得

低ジッター

高縮重度超放射発振モードの発見



世界最高出力(2.34kW)、最高効率(6%)の達成。  
光共振器の完全同期長発振、超短パルスの生成。



Nishimori et al., Phys. Rev. Lett. (2001)

自己変調  
超短パルス

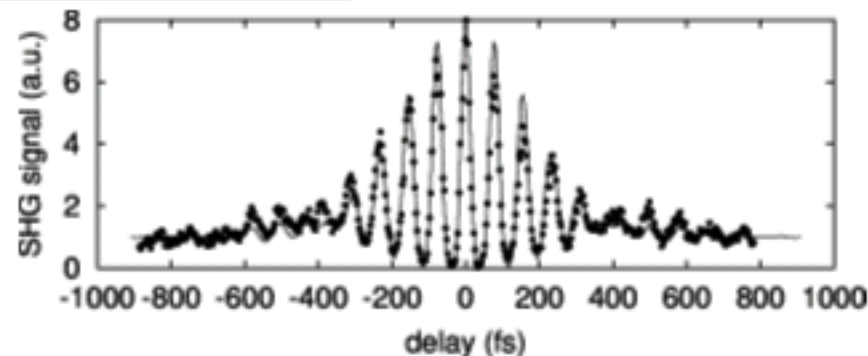
光と電子の自己同  
期化による高効率

319fs (4.09 $\lambda$ )

↓ チャープ補償

121fs (1.55 $\lambda$ )

パルス圧縮

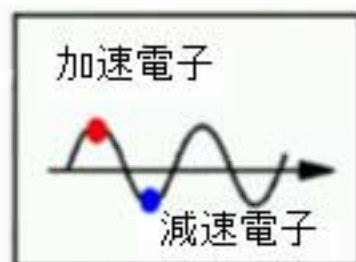


Hajima et al., Phys. Rev. Lett. (2003)



# エネルギー回収型リニアック(ERL)の開発

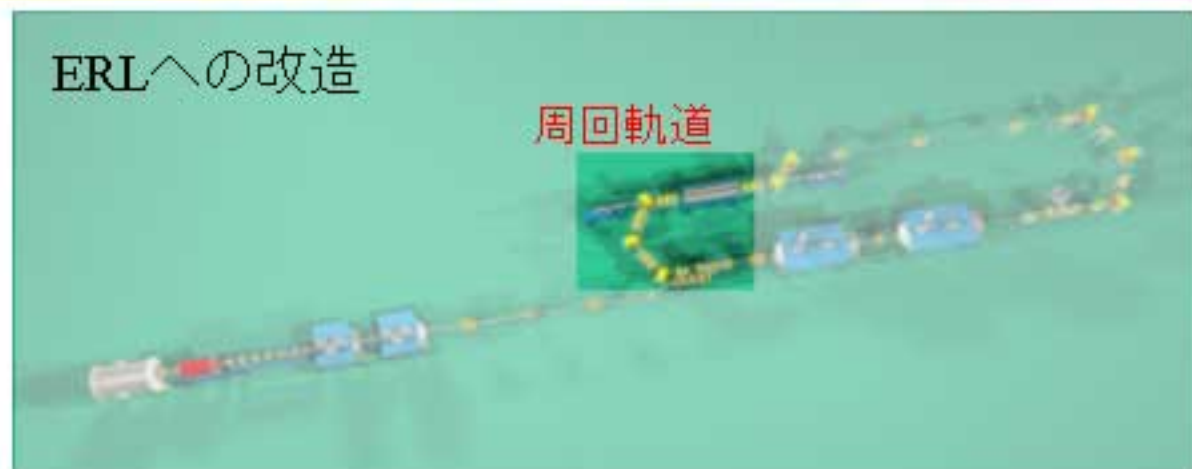
## ERLの原理



電子エネルギーを超伝導空洞で回収

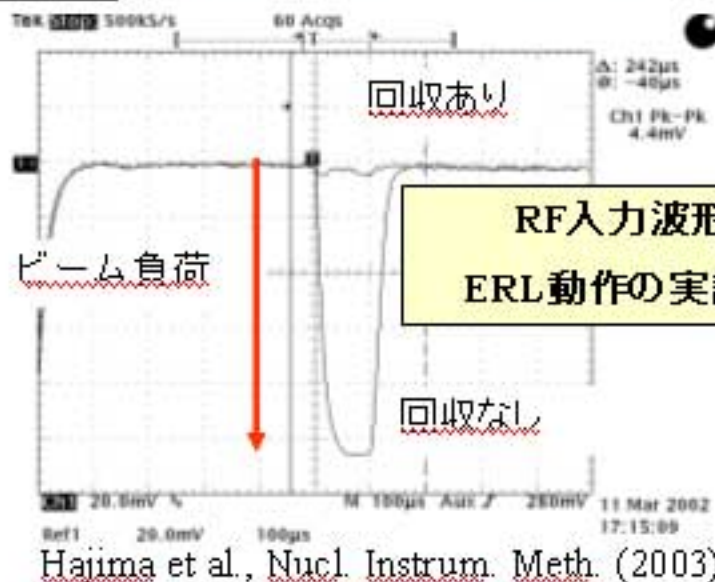
- 後続電子の加速に再利用
- RFの節約(大電流可能に)

## ERLへの改造

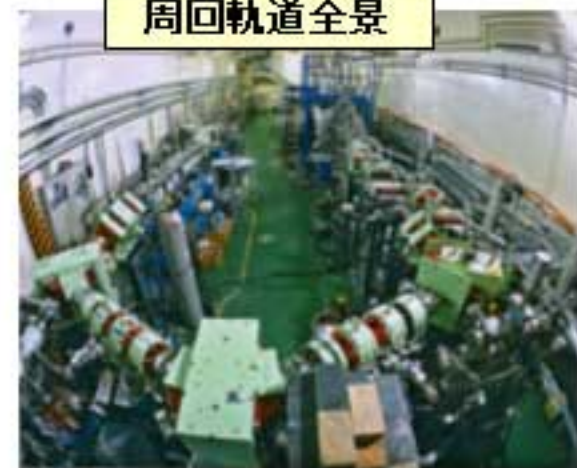


## ERL開発の系譜

- 1965: ERLの提案(M Tigner)
- 1985-90: 大強度FEL開発  
SDI計画  
ビーム不安定性の出現  
→ ERL動作せず
- 1990-1999  
(超伝導加速器技術の成熟)
- 1999: 最初のERL実証(JLAB)
- 2002: 原研ERL完成



## 周回軌道全景



## ERLの設計、製作、動作実証(1999~2002)

高出力ERL-FEL、及び、ERL型次世代高輝度光量子源への基盤技術を確立



# 産業利用可能な10kW級 ERL-FELの開発

原研が獲得した技術

超伝導リニアック  
FEL、ERL  
超放射発振



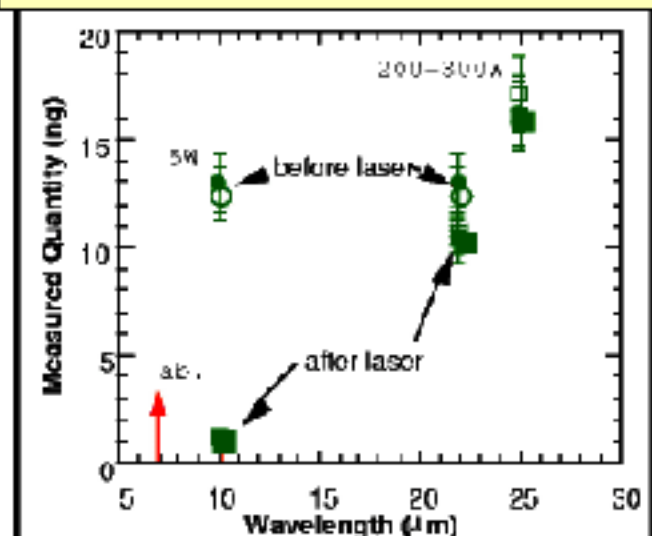
実現可能となる光源

高出力、高効率  
波長可変  
フェムト～ピコ秒の  
超短パルス



原子力をはじめとした  
産業利用の展開

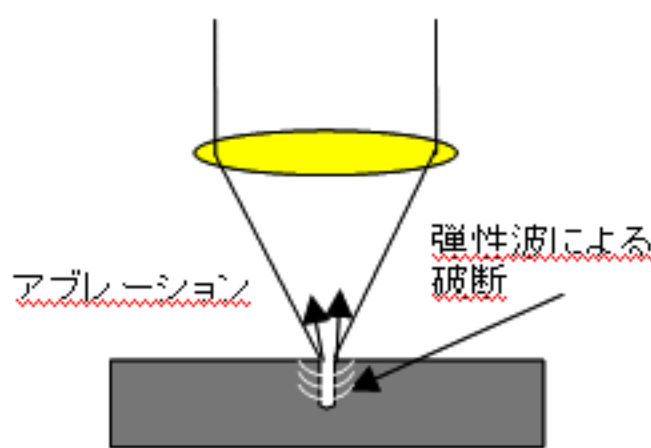
## FELによるダイオキシンの分解



山内他、環境科学会誌、14 (2001)

## FELによる非熱加工

ピコ秒、フェムト秒レーザー



## FELによる廃炉技術

ファイバー伝送可能な  
発振波長

高出力、超短パルス

アシストガス不要の  
クリーンな切断

↓  
二次汚染の無い  
廃炉処理

原研ERLのアップグレード (2003～2005)

入射器増強により世界最大ビーム電流(40mA)、10kW級FELを開発中。

# ERL技術に基づく、次世代高輝度光量子源の提案

## ERL技術の確立

リニアックと蓄積リングの長所を  
併せ持つ新しい加速器

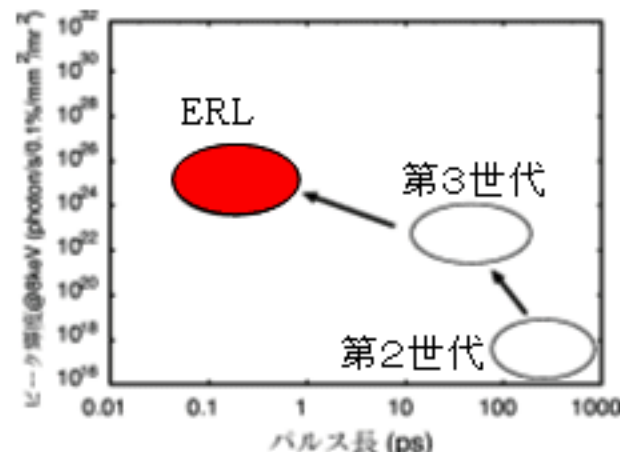
↓  
大電流かつ高輝度、短パルス

↓  
大強度、高輝度の光量子源

## ERL型光量子源の提案

第3世代光源(Spring-8)の限界を  
超越する次世代光源

フェムト秒の超短パルス  
干渉性(コヒーレンス)  
ナノメートルの極小ビームサイズ  
第3世代と同様の汎用性



## フェムト秒パルスの利用

タンパクの局所構造変化を伴う機能発現の解明  
光誘起相転移を用いた新物質の開発

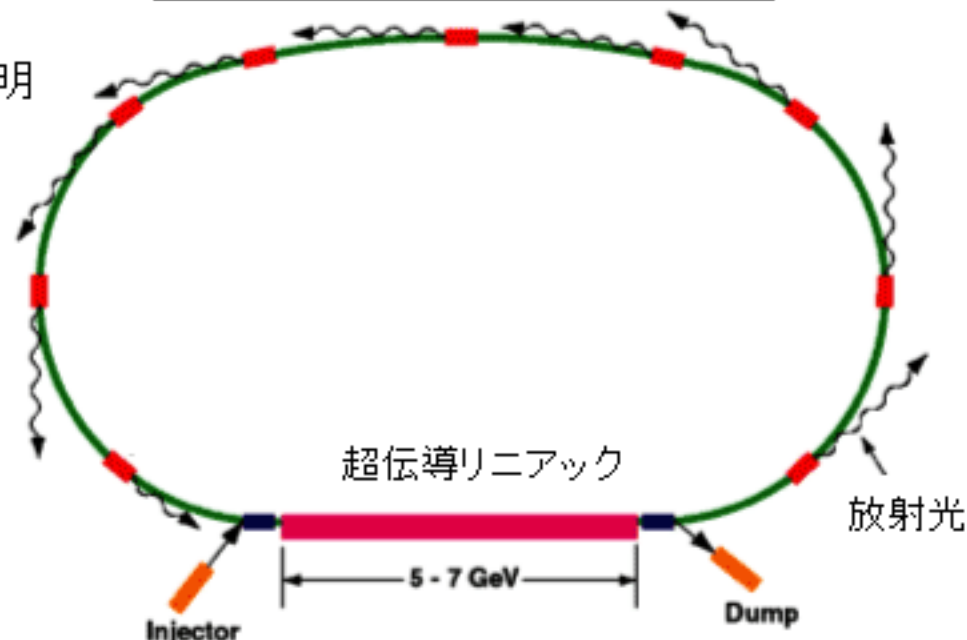
## 高コヒーレンスの利用

結晶性を必要としない、単粒子X線回折

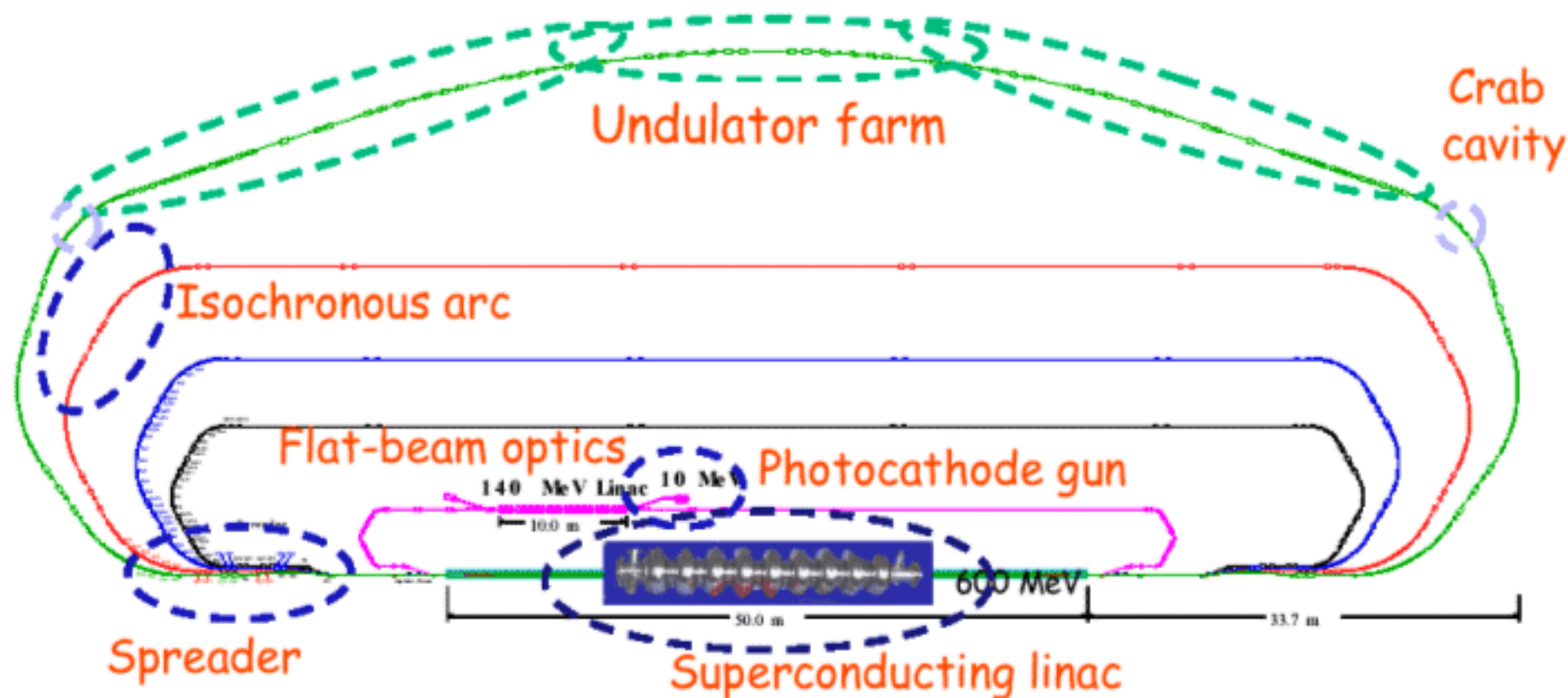
## 極小X線ビームの利用

極微小領域の構造解析、顕微X線分光

## ERLによる次世代X線放射光源

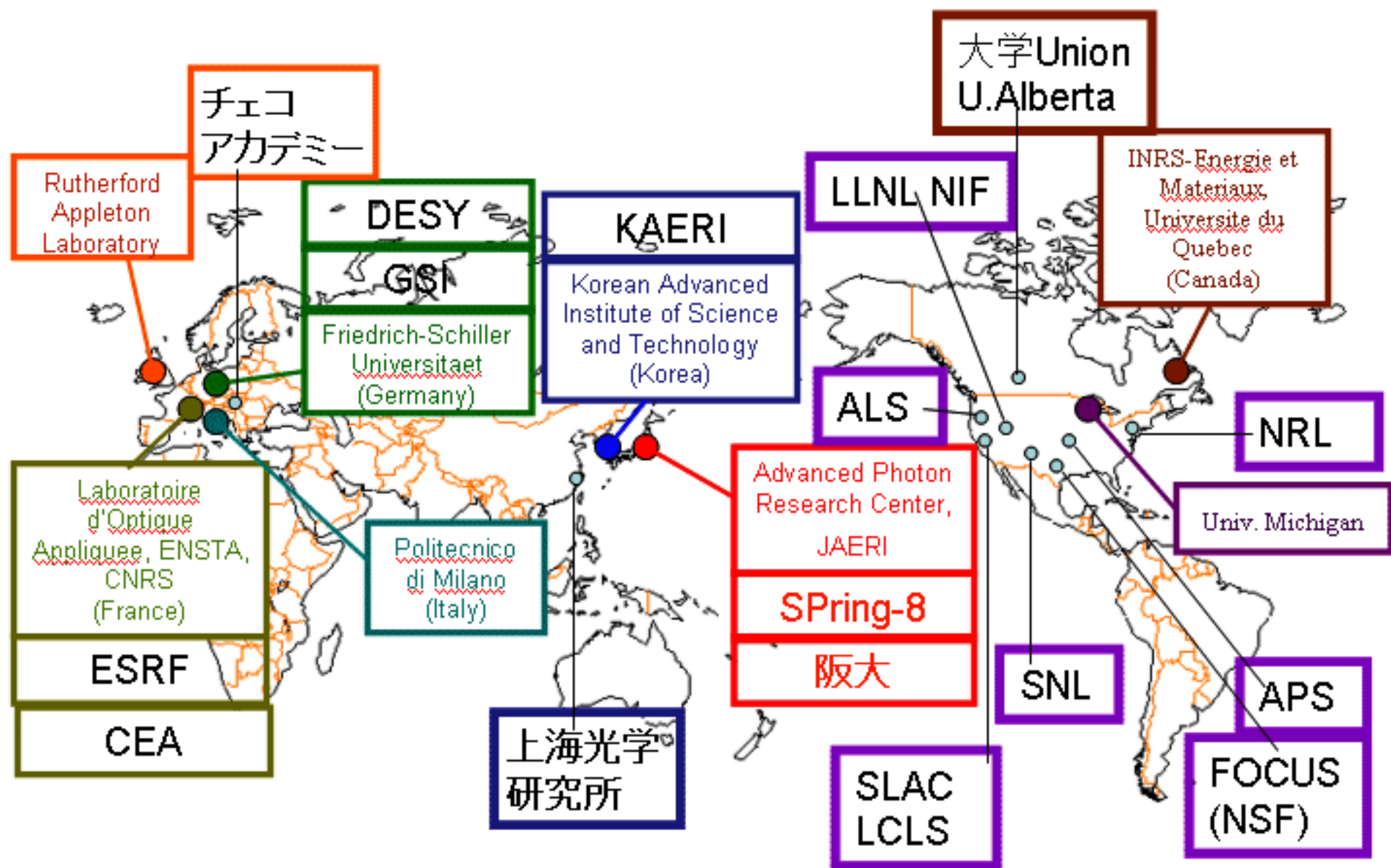


# A schematic of the machine



Recirculating Linac X-ray Source for Ultra Fast Science

LBNL: A. Zholents, August 21, 2001



## 米国

NIF(LLNL): 4000億円、超PWレーザー計画(200億円)、  
 マーキュリー計画(半導体レーザー開発)  
 オメガレーザー(ロチェスター大): 約100億円、PWレーザー(約20億円)  
 サンディア国立研究所: PWレーザー  
**BNL: 炭酸ガスレーザー**  
 NRL: Tキューブレーザー、エキシマレーザー  
 LBL: Tキューブレーザー  
 ミシガン大(CUOS): 100TW/PWレーザー  
 NSF FOCUS (テキサス大/ミシガン大)  
 APS、ALS 第3世代光源  
 SLAC LCLS: X線FEL(線形加速器)約300億円、SSLC  
 ジェファーソン研究所: FEL  
 Duke大: FEL

## 英国

Rutherford(RAL)研究所: 超PWレーザー(Ti-Sapph)、PWレーザー(ガラス)

## フランス

LMJ(CEA): 4000億円、超PWレーザー計画(200億円)  
 LULI: 100TW/PWレーザー  
 LOA: Tキューブレーザー  
 ESRF: 第3世代放射光施設

## ドイツ

GSI: PWレーザー  
 MPI: Tキューブレーザー  
 Jena大: PWレーザー、半導体レーザー  
**DESY: X線FEL(線形加速器)約1000億円**

# OECD/GSFで先進レーザー推進の国際運動に指導性発揮

## 「Committee on Compact High-Intensity Short-Pulse Lasers」

( GSF:Global Science Forum )

- 小型高強度短パルスレーザー：高強度性、短パルス性、小型性 → 基礎科学、生命科学、環境、製造、情報などに、レーザー利用領域を広げる大きな波及効果を与えると期待。
- 多くの国々で開発が進められているが、情報交換等の協力体制がなく、各国バラバラの開発が現状。

★2000年 我が国（佐藤征夫GSF委員（原研理事））のOECDへの提案  
＝ “ 高強度レーザーは科学技術政策で重要。そのため上記国際委員会を設置。”

★2000－2004年 OECDで上記委員会を設置  
我が国の代表者（加藤義章（原研理事））委員長、9カ国12名の委員

★2001年原研関西研、2003年仏光学応用研でワークショップ開催  
（2003年ドイツ、2004年米国で開催予定）

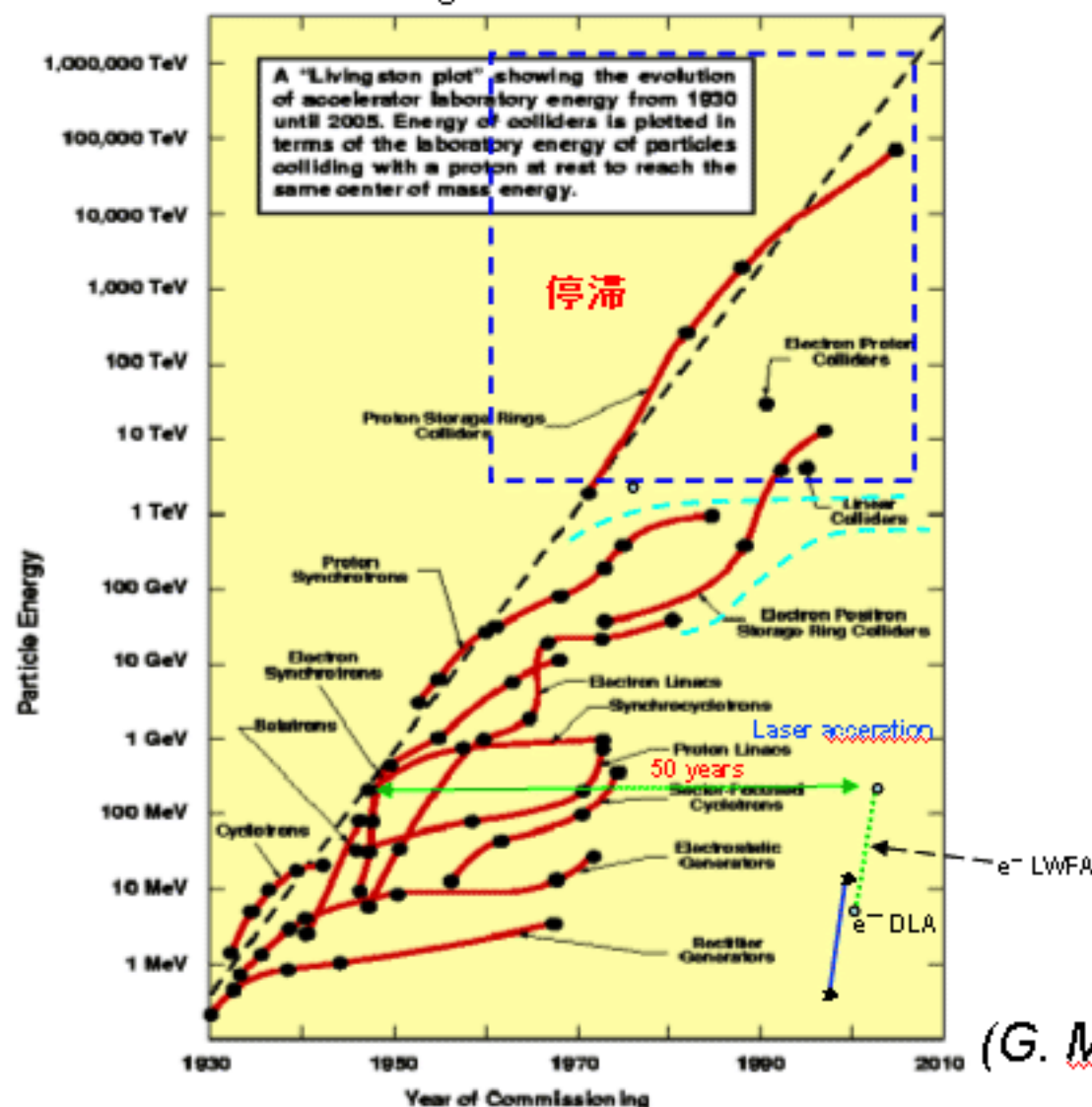
★2003年1月 IUPAP（国際物理・応物連合）理事会：  
超高強度レーザー・応用開発を推進するためのIUPAP国際委員会(ICUIL)  
設置の承認



# 加速器技術 vs. 光技術

加速器: 20世紀の技術  
(E. Lawrence 1930年代~)

Livingstone Chart



光技術: 21世紀の技術  
(1960:レーザー発明、1990~:CPA技術)

波長:  $10^{-3} \sim 10^{-4}$

エミッタンス:  $10^{-3} \sim 10^{-4}$

加速勾配:  $10^3 \sim 10^4$

(レーザー駆動粒子加速の場合)



加速器  レーザー

加速技術とレーザー技術  
の掛け合せによるブレー  
クスルー

(G. Mourou)

SPring-8の8GeV電子ビームと超伝導リニアック自由電子レーザーからの高出力レーザー光を相互作用させることにより高輝度 $\gamma$ 線を発生させる。

光核反応、核物理の新たな展開



超伝導リニアック  
自由電子レーザー

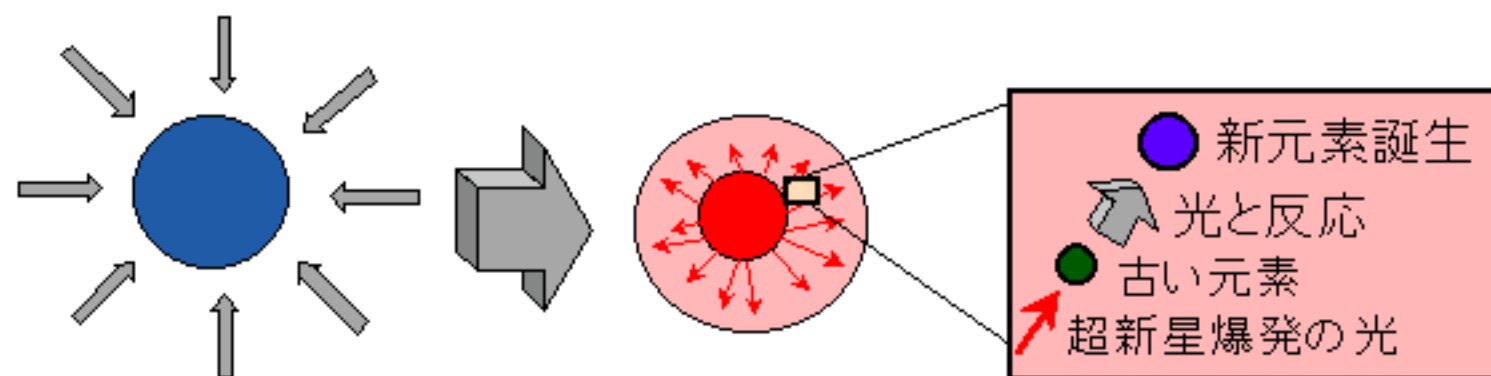
IR FEL

$e^+$ , ...  
核物理  
核変換

$\gamma$ 線

SPring-8  
 $\gamma = 16000$

## 光核反応による重元素合成過程



## 重たい星が重力崩壊

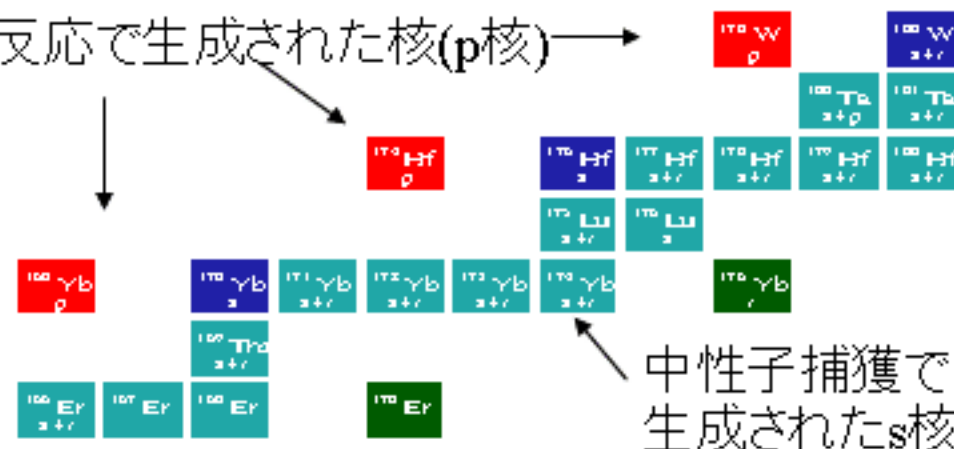
## 超新星爆發

光核反応による重元素合成

ブルームスを使った数例の  
実験しか現在はまだ無い。

レーザー逆コンプトンガンマ線を用いた光核反応断面積の系統的な実験が必要。

光核反応で生成された核(p核)→



中性子捕獲で生成されたs核

Jena Univ.(2003): Laser Driven High Energy Electrons  
 → Foil →  $\gamma$  ray → Transmutation

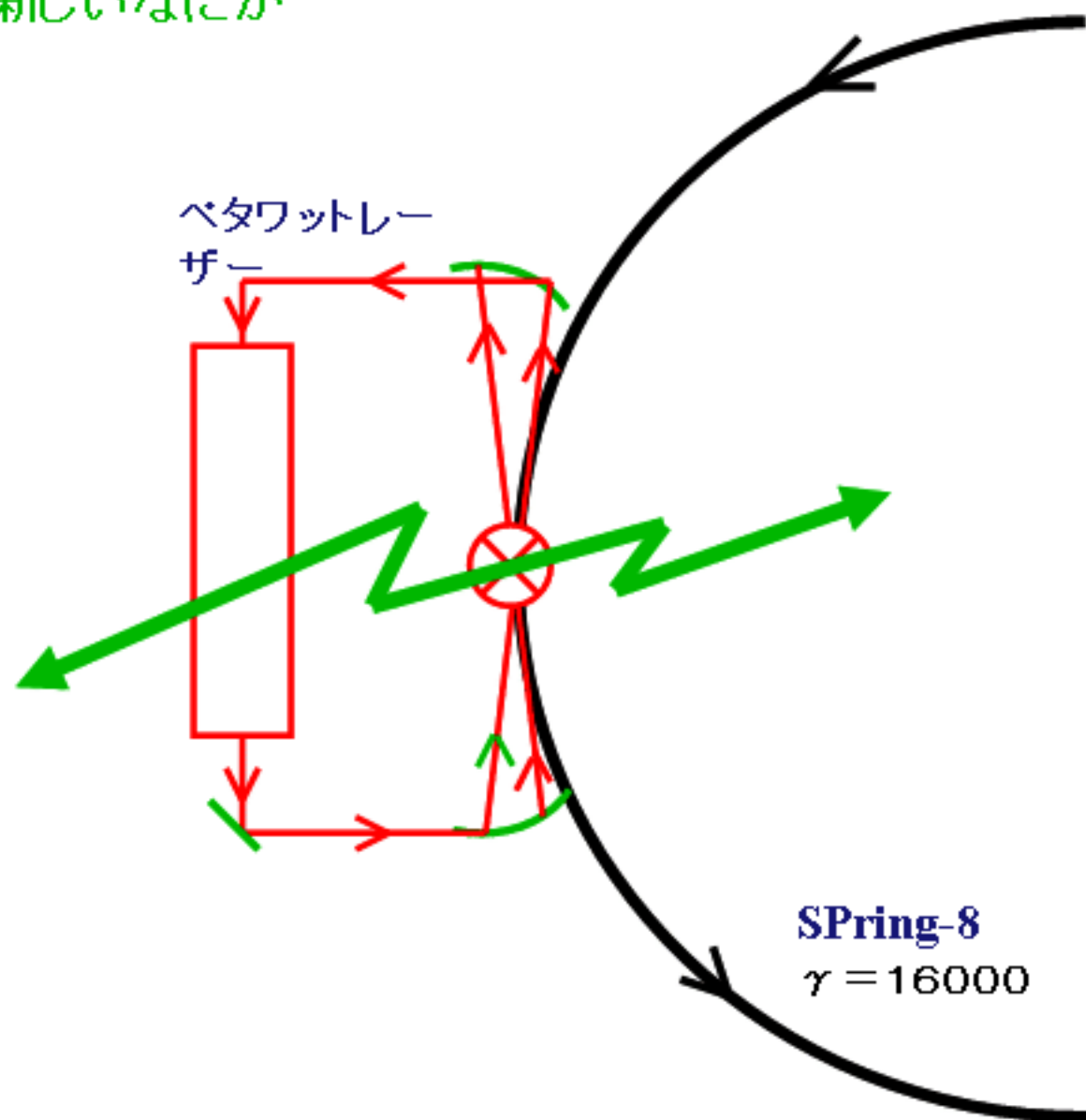
$$^{129}\text{I}(\text{半減期:約1600万年}) \rightarrow ^{128}\text{I}(\text{半減期:約25分})$$



光 ⊗ 電子リング = “ 新しいなにか ”  
(レーザー ⊗ 放射光)

新しい領域:  
「真空崩壊」  
一般相対論効果、  
....

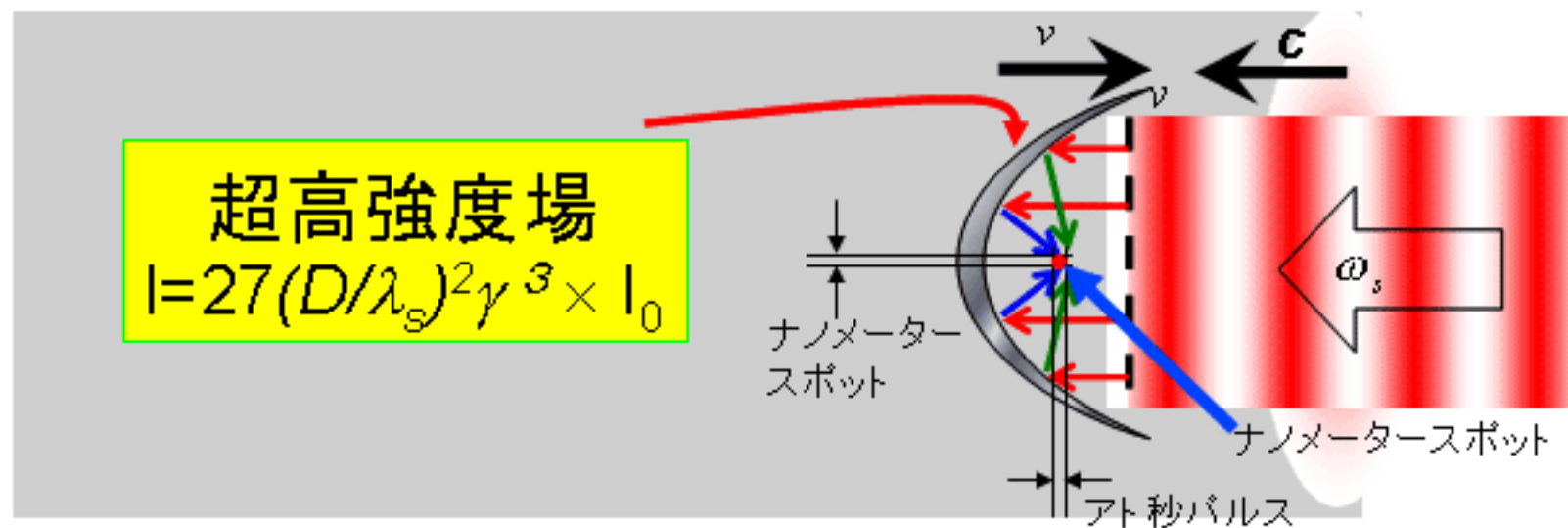
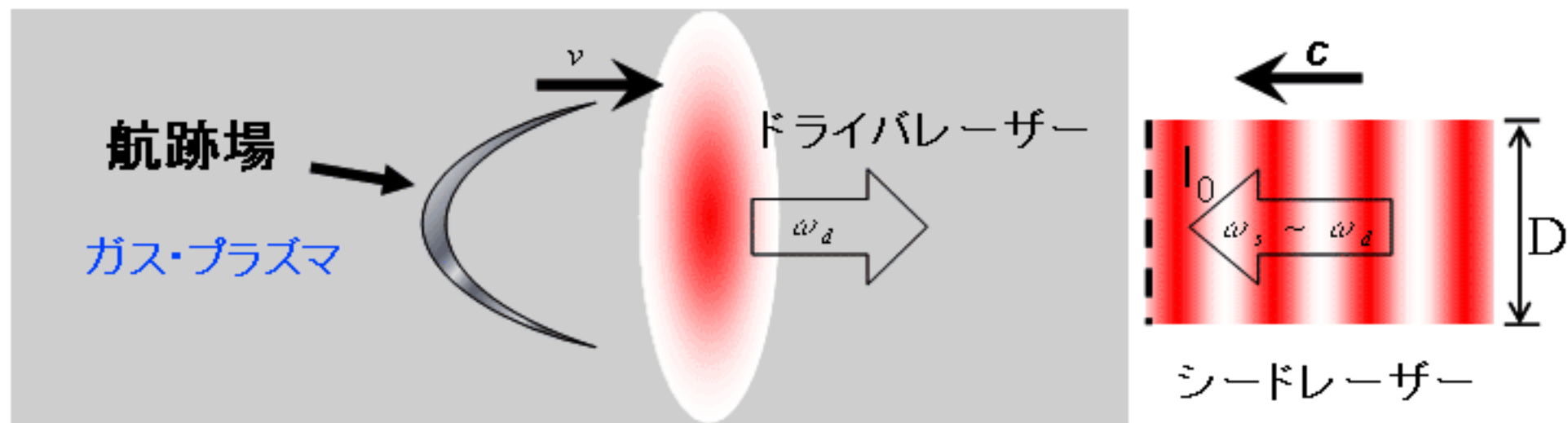
$I_0$  増加 →  $I = \gamma^2 I_0$





# レーザー ⊗ レーザーの掛け合わせ

## 航跡場放物面鏡による超高強度場生成



(相対論工学の一例)

## 結語(主として①、②、⑥の諸点につき)

- ・レーザー: 急速な技術革命中(短パルス化、高強度化、小型化、高繰返化)。  
当所: 世界のCOEの一つ  
多彩な原子力科学技術応用、特に先端加速器技術応用が拡大中
- ・当所(や日本): コンパクト高強度固体レーザー、ERL-FEL、X線レーザーで主導性
- ・広い産業、原子力、医療、高エネルギー利用:  
PET源、小型加速器、癌治療器、高エネルギー加速器要素(入射器など)
- ・より高信頼性、高フルエンス、高効率の要  
⇒ 半導体技術 ⊗ 光科学技術
- ・光科学技術 ⊗ 加速器技術 ⇒ 新しい可能性の世界  
(FEL技術も含む)
- ・当所の第3世代光源への責務と次世代光源への使命  
⇒ 汎用性、独創性、独自性のあるERL放射光源
- ・原子力研究 ⇔ 高エネルギー加速器研究