サイエンティフック･システム研究会、２００６年１１月
２００６年度　ＳＳ研合同分科会資料

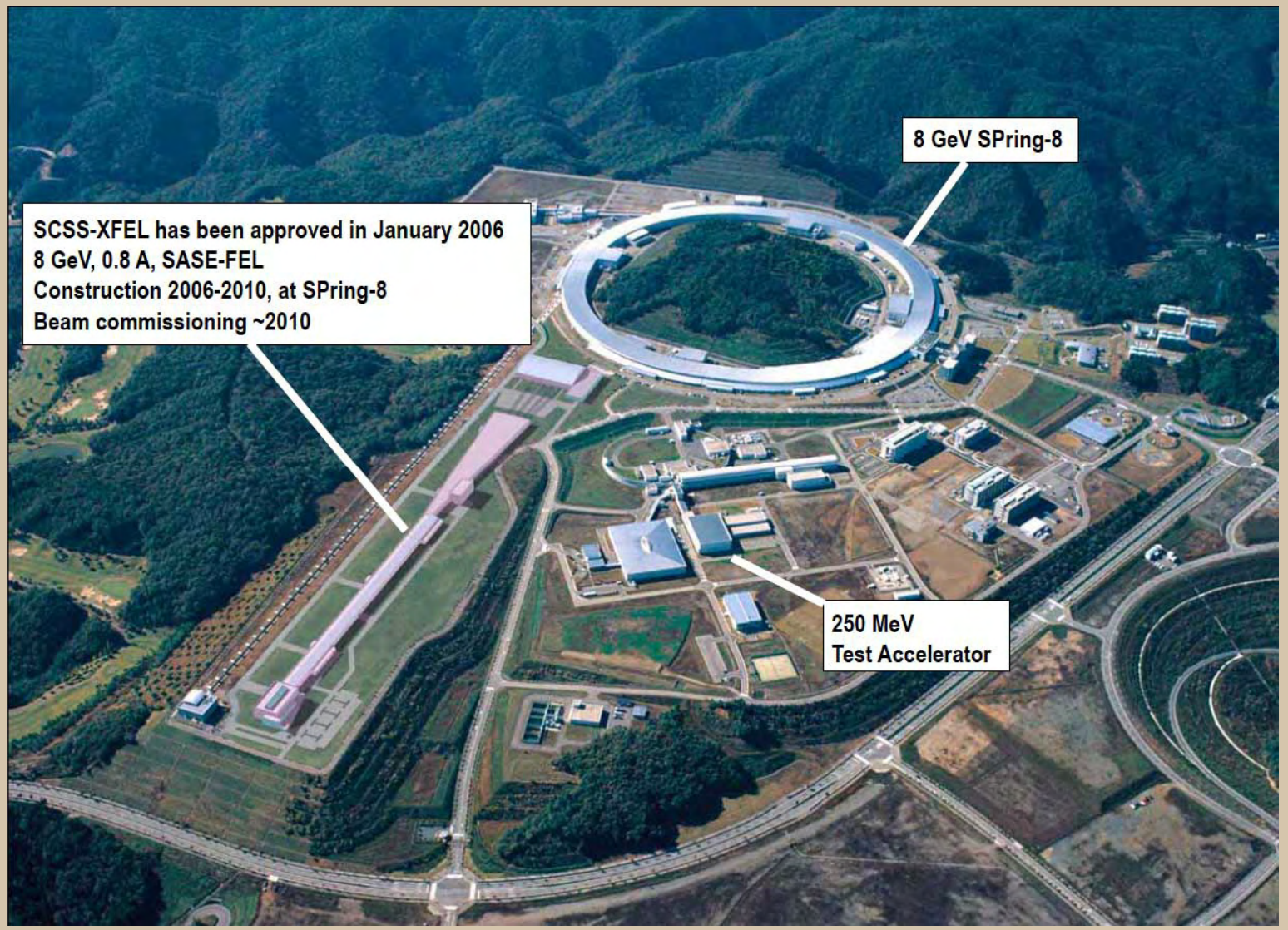
次世代の扉を拓くＸ線ＦＥＬ

理化学研究所、播磨研究所
新竹　積

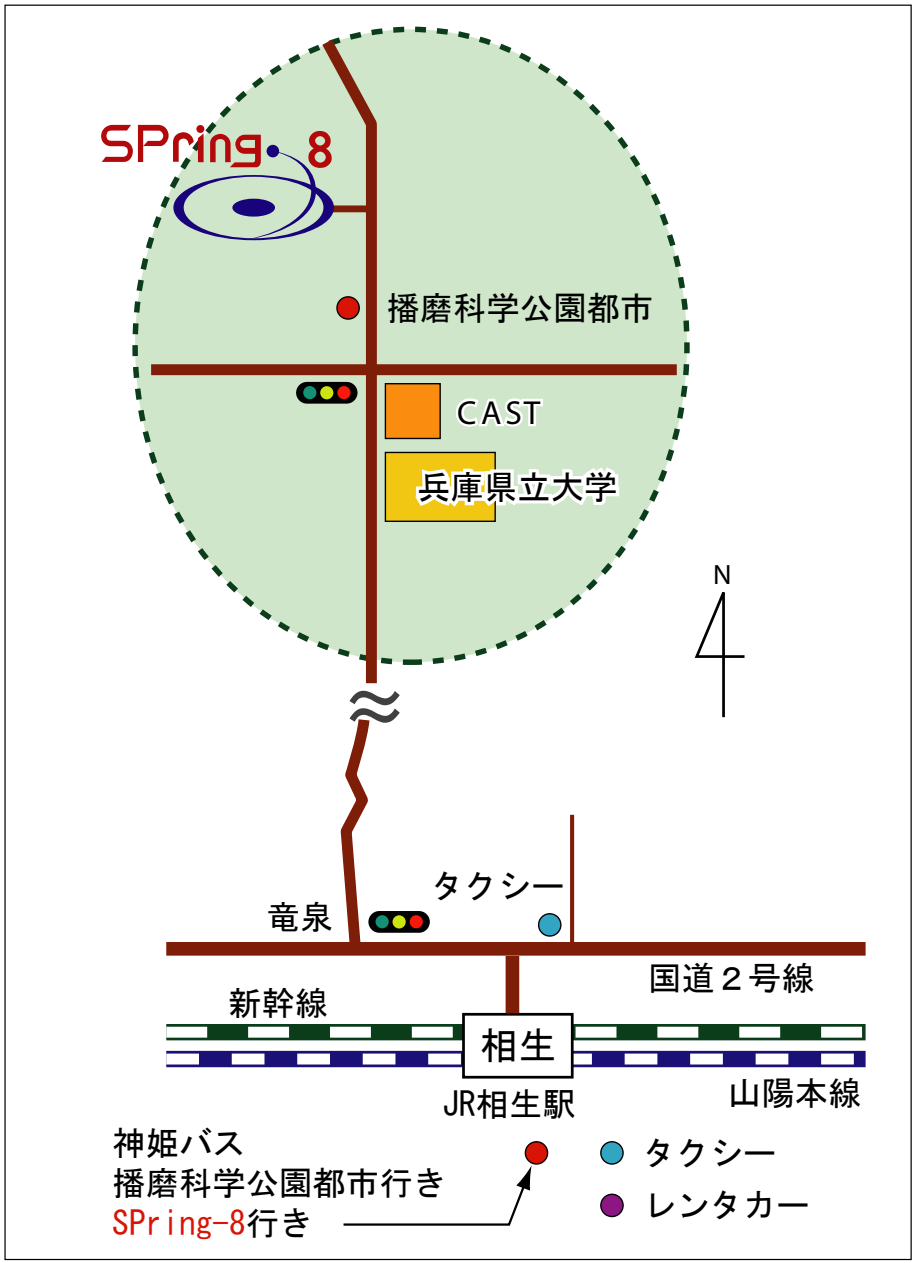
- Ｘ線レーザーとは
- Ｘ線レーザーが拓くサイエンス
- 国際競争
- 動作原理
- 実現する技術
- 試験加速器での成功
- 実機建設へ

shintake@spring8.or.jp　　http://xfel-spring8.or.jp

XFEL Project at SPring-8/RIKEN

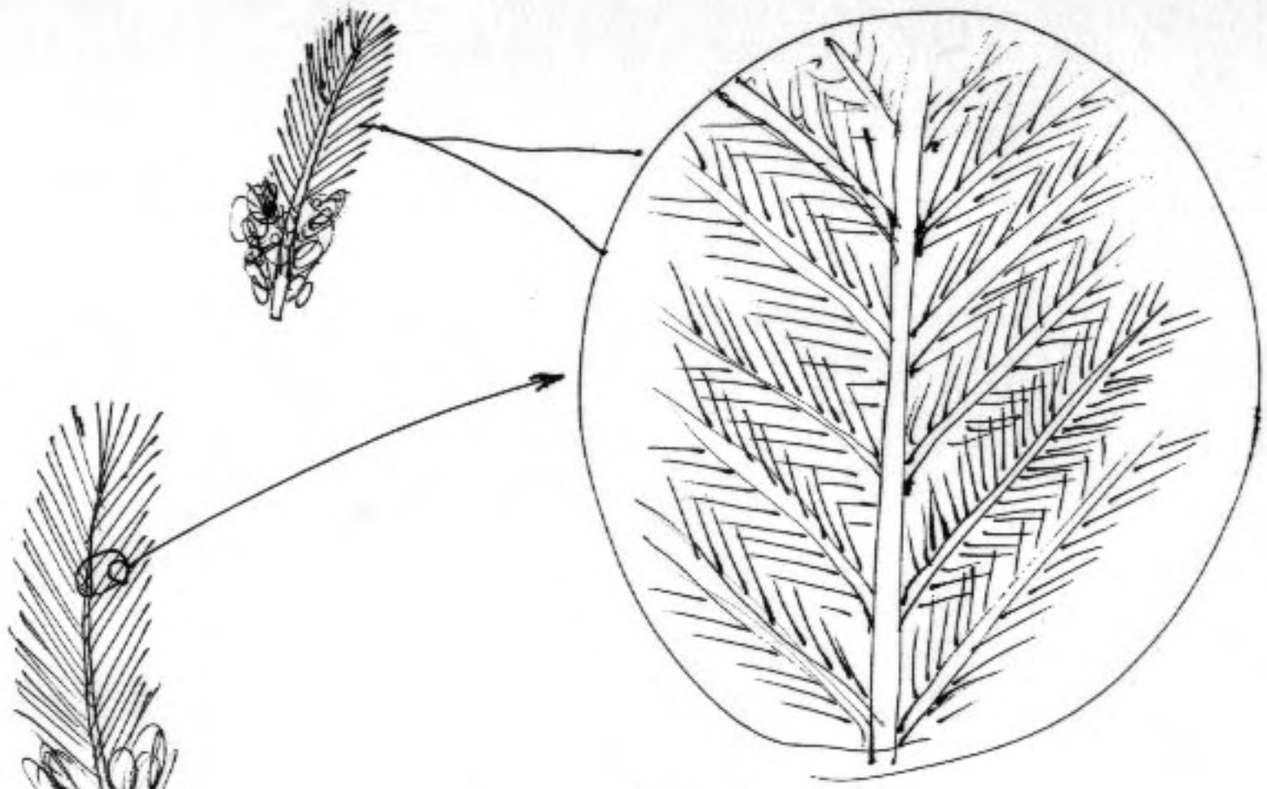


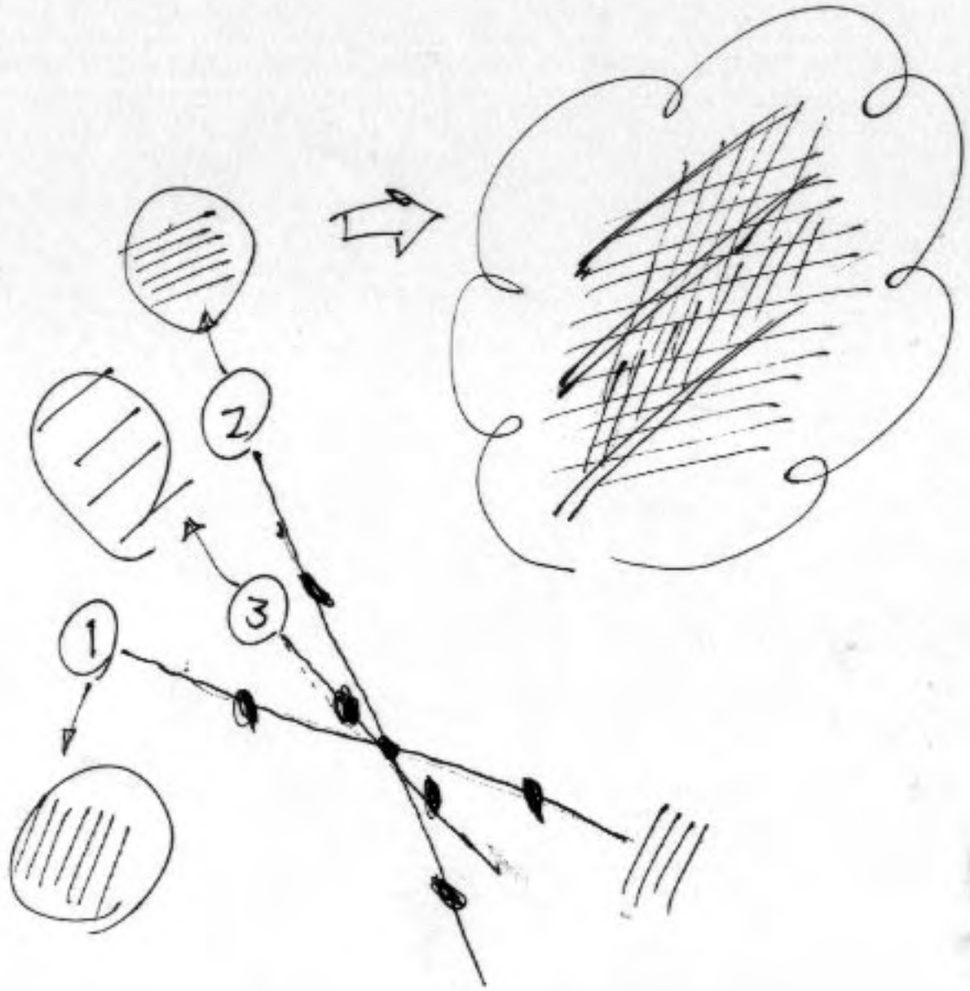
SPring-8 へのアクセス



Skintale

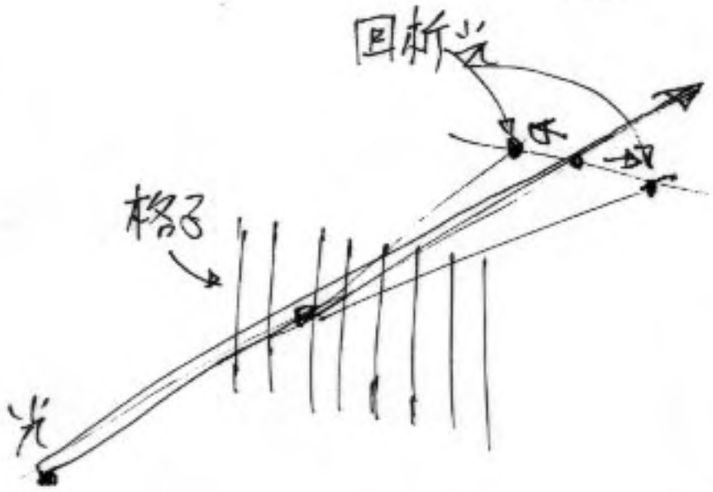
鳥の羽根，回析

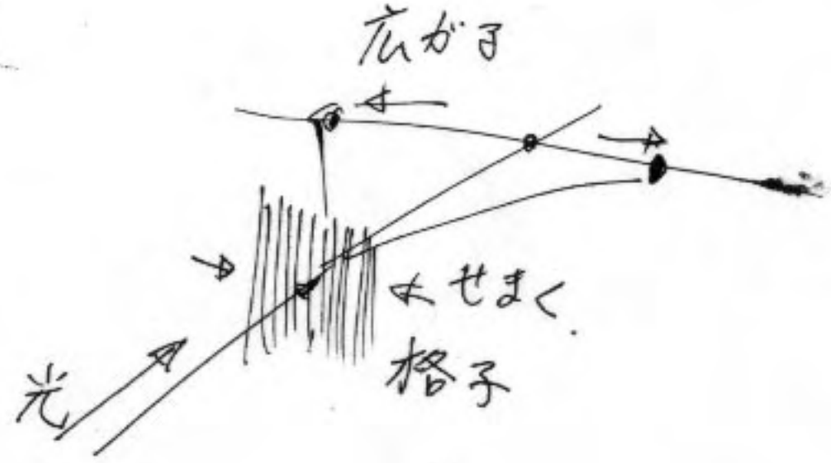




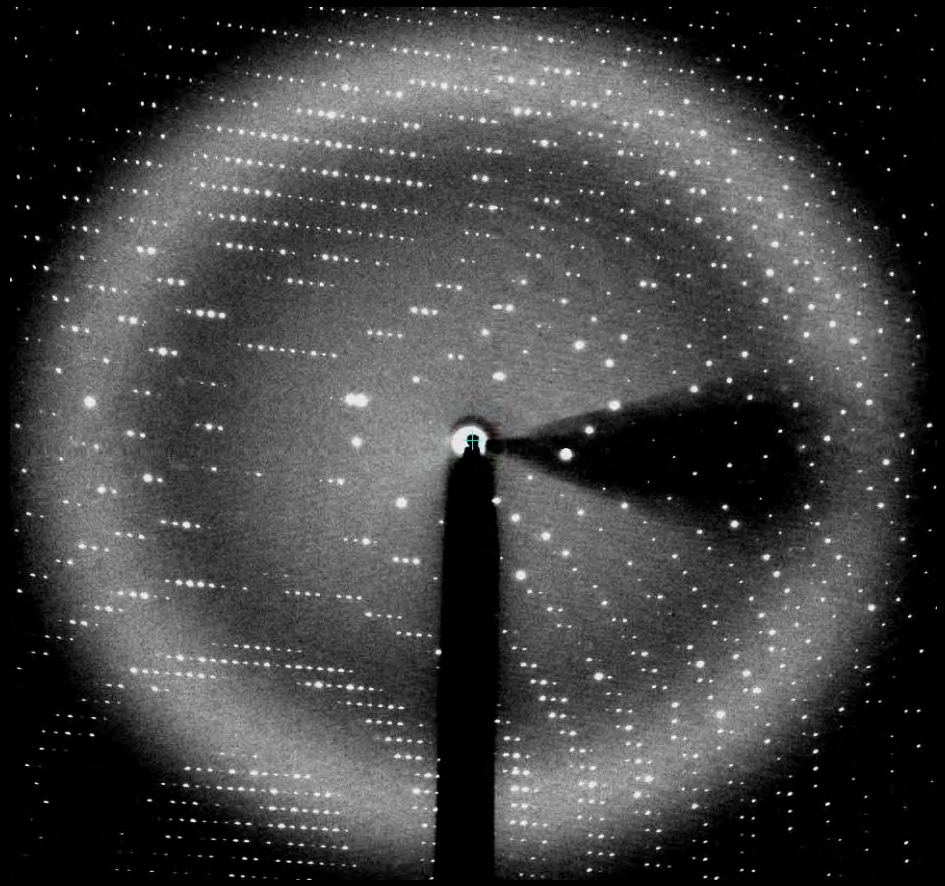
$$\theta = \frac{4\,cm}{1\,m} = 40\,m\,rad$$

$$P = \frac{\lambda}{\theta} = \frac{532\,nm}{0.04} = 13\,\mu m$$

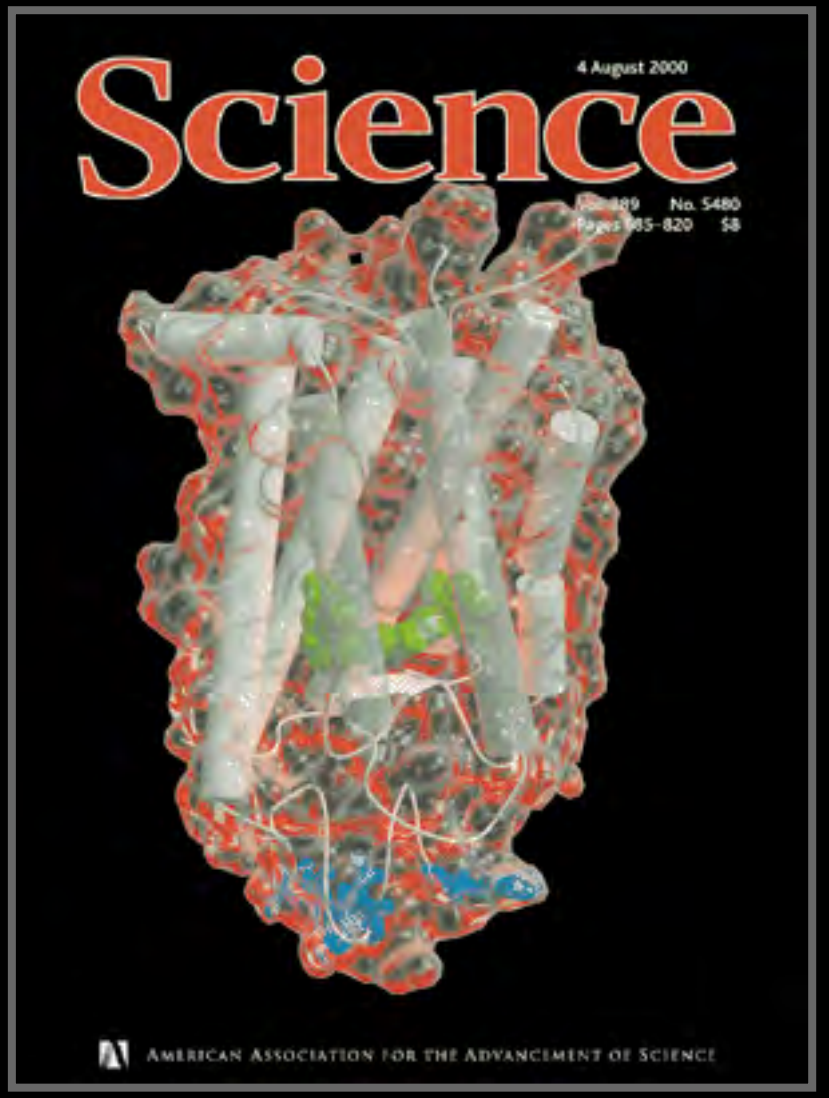




ロドプシンの構造決定



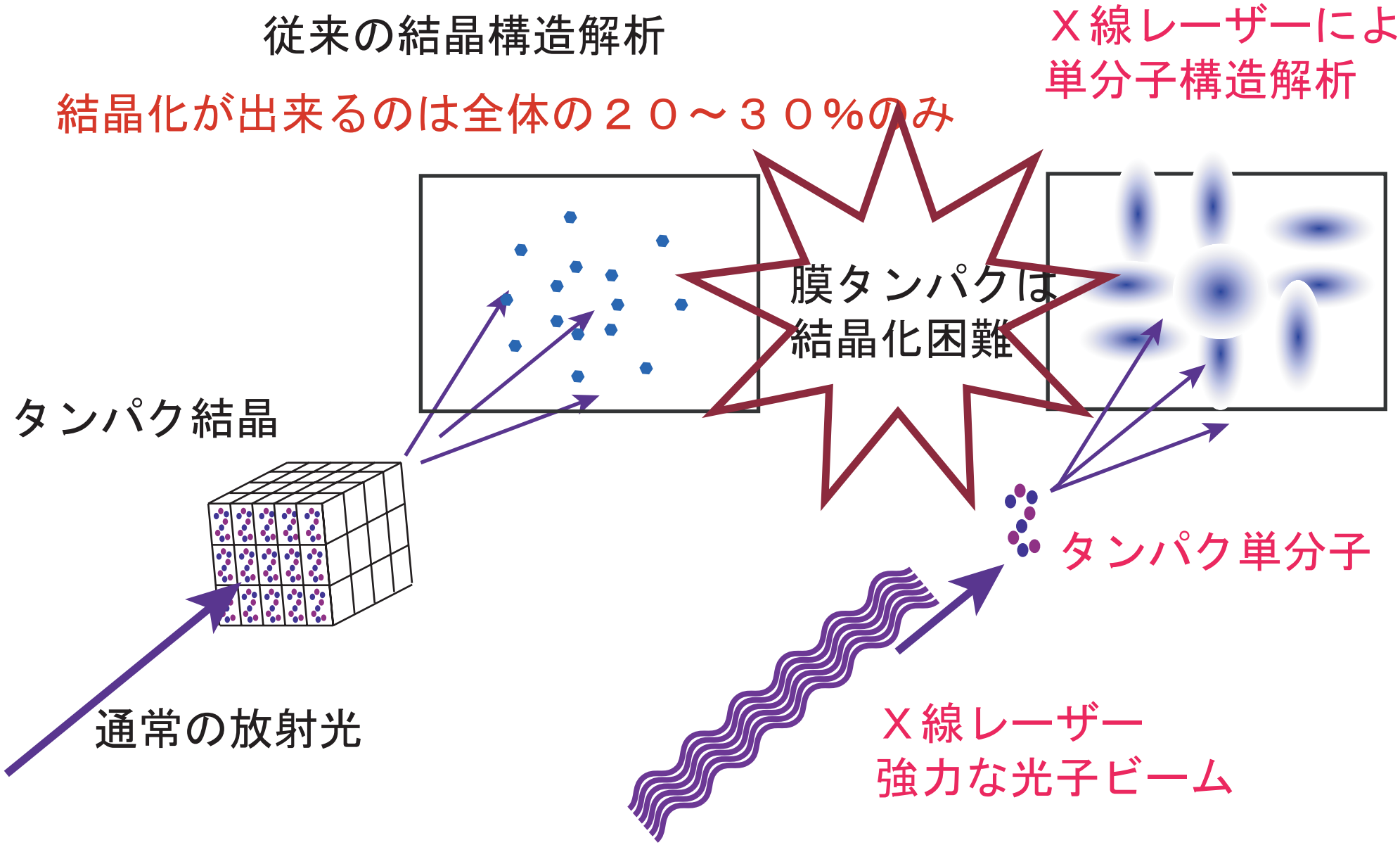
Courtesy of M. Yamamoto



Dr. Masashi Miyano

Ｘ線レーザーによるタンパク質の単分子解析

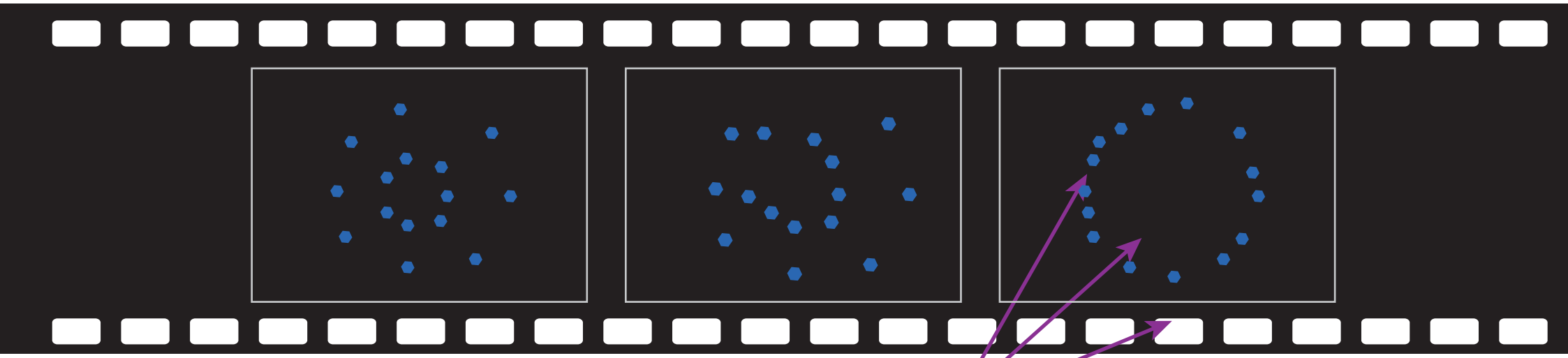
T. Shintake



X線レーザーによる超高速反応の観察

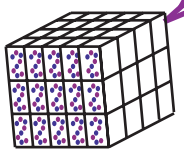
T. Shintake

物理、化学反応の構造変化をフェムト秒のスピードで記録



可視光フェムト秒レーザー

Pump



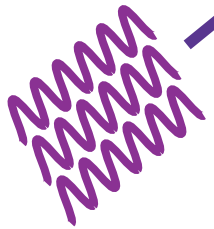
超高速光伝送デバイス

超高速光記録デバイス

X線レーザー

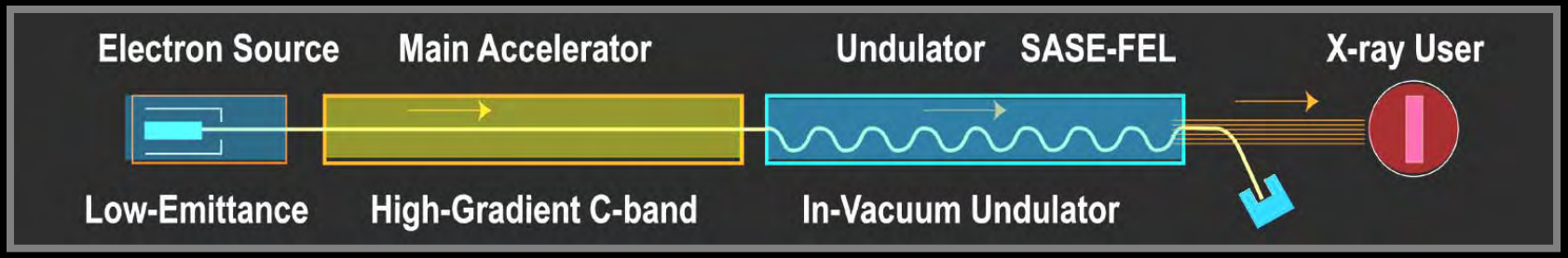
短パルス（フェムト秒）

Probe



SPring-8 FELの特徴

X-ray FEL



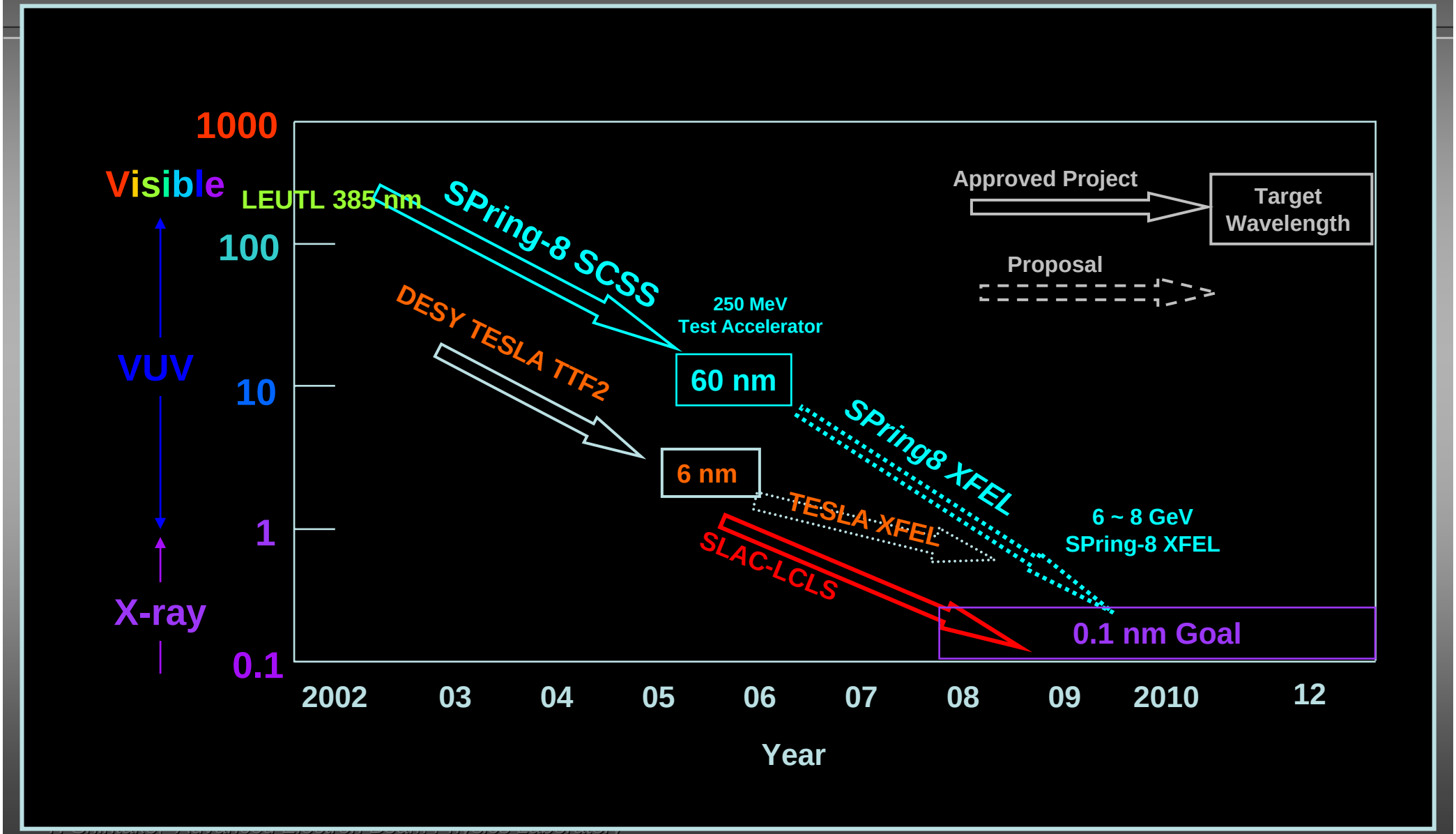
- 低エミッタンス電子銃 → FELゲイン大
- 高電界Cバンド加速器 → 短い加速器トンネル → 施設コスト低減

KEK C-band 35 MV/m x 30 m = 1 GeV

- 短周期の真空封止型アンジュレータ → 電子ビームエネルギー低減

Kitamura's In-Vacuum Undulator : E = 1GeV, λu = 15 mm, λx = 3.6 nm

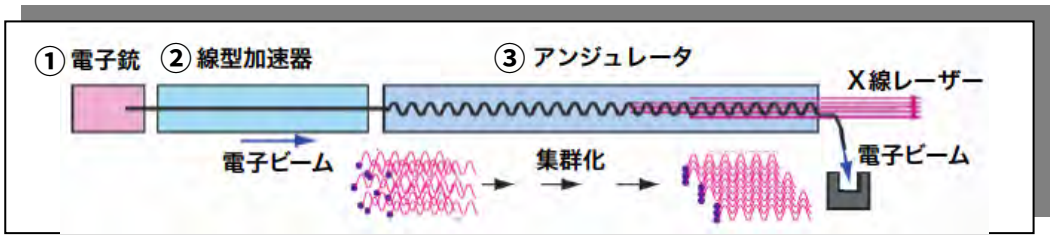
Milestone of SPring-8 X-FEL



21世紀の物質科学・生命科学を拓く

線型放射光（XFEL）プロジェクト

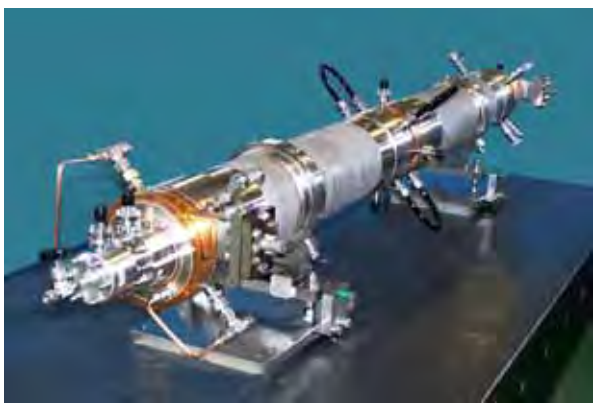
理研・播磨研究所は、原子レベル分解能を有する次世代のX線回折顕微鏡を開発するため、短パルスかつ高度に干渉した放射光源の要素技術開発とその光源利用実験を実施しています。将来、この研究により、物質科学、材料科学、生命科学など様々な分野で新しい科学テーマの展開を期待されます。



①熱カソード型超高電圧電子銃

低エミッタンス・高品質の電子ビームを得るために、単結晶CeB_6を熱カソードとする500kVの高電圧電子銃を開発しています。

②高加速勾配C-バンド加速管



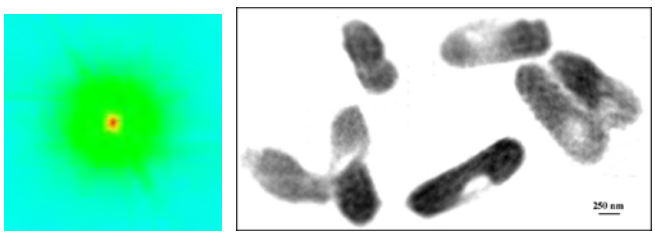
コンパクト性と低コスト性を追求するために、40MeV/mの高加速勾配性能を持つ周波数5.712GHzのCバンド加速管を開発しています。

③真空封止型アンジュレータ

短周期アンジュレータとして最も信頼性のある真空封止型アンジュレータをXFEL(X線自由電子レーザー)用の光源として開発を進めています。

ナノ構造計測　化学反応過程観察

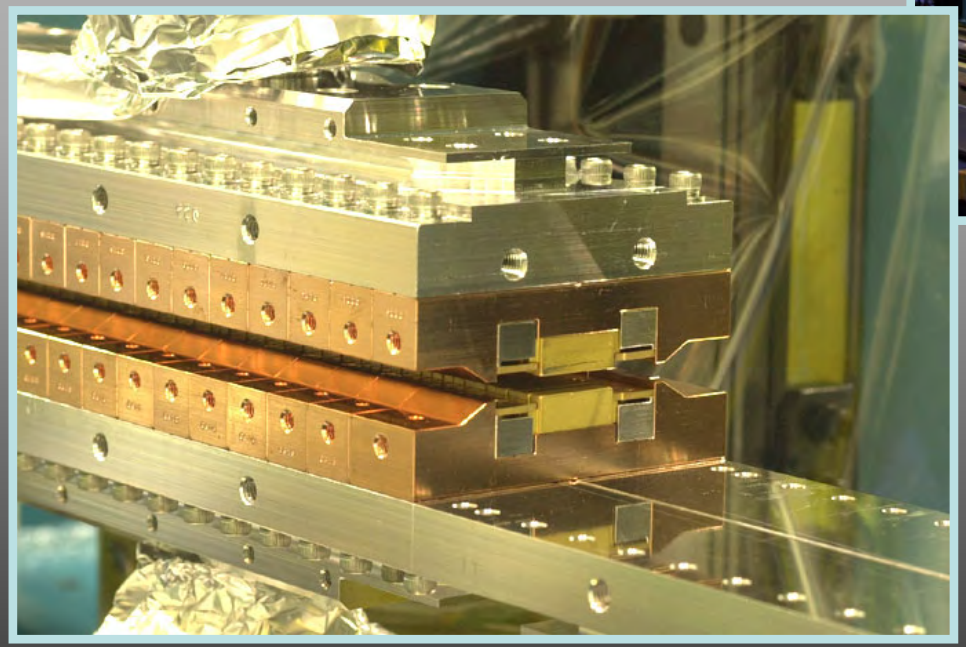
生体試料のリアルタイムイメージング　1原子レベル解析



アンジュレータ放射光を使用しましたX線回折顕微鏡による大腸菌の観測例（分解能50 nm）。左は回折像、右は復元像。XFELを使うと原子レベルの細胞の生きたまま観察が可能となるでしょう。

In-Vacuum Undulator for SCSS X-FEL

- Segment length 4.5 m
- N = 300/segment, λ_u=15mm
- K~1.3, at Nominal gap 3.5 mm
- Mechanical minimum gap = 2mm
- 45-deg. tilted Halbach type
- More compact than ordinary ones

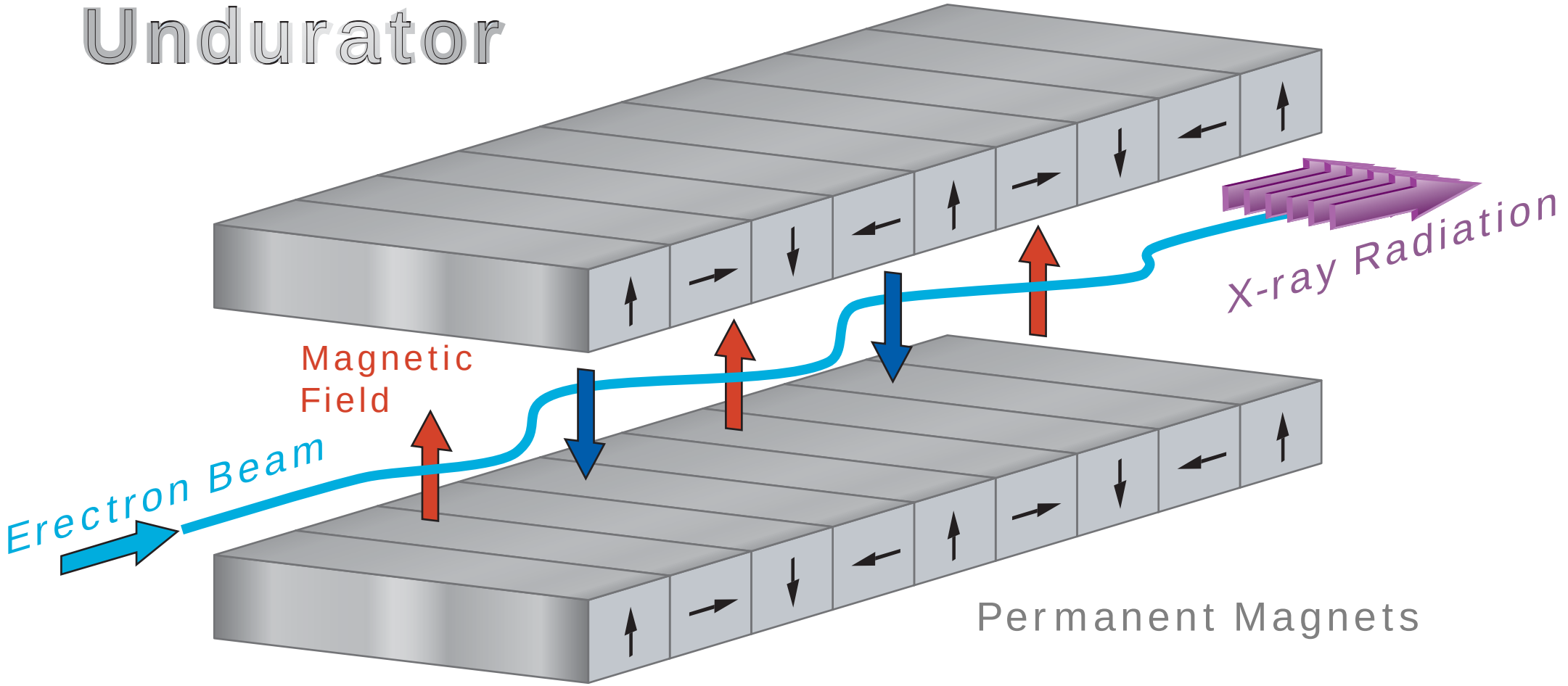


First prototype model

Gap can full-open 25 mm, which
provides optical alignment laser pass,
and enough beam acceptance
at the beam commissioning time.

X線FELの動作原理

- XFELはコヒーレントな（アンジュレータ）放射光である
  - Radiation2Dをごらんください。
- コヒーレント効果（息のそろった助け合い、強めあい！）
- 増幅現象は、電子のマイクロバンチ化である。
  息をそろえるために、バンチとして集まる。
- 光と電子の相互作用
  アンジュレータ放射が電子をバンチ化し、光が強くなり、これがまた、電子をバンチ化する。自己増幅 Self-Amplified Spontaneous Emission → SASE


Undurator
Magnetic
Field
Erectron Beam
X-ray Radiation
Permanent Magnets

http://www-xfel.spring8.or.jp

SPring-8 Compact SASE Source

021653

Index

- Milestone
- What is SASE?
- Low Emittance Beam
- C-band Accelerator
- In-vacuum Undulator
- SCSS Beamline
- Optics

Information

- Publications
- Presentations
- Research members
- Page Links

For SCSS Staff

What's NEW!!

10 May 2005: SCSS conceptual design report has been released. Click **here** to download (6.7MB).

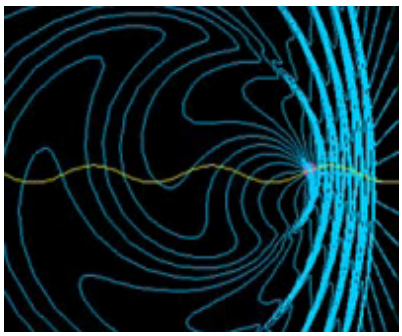
Welcome to SCSS Home

SCSS is an abbreviation for the SPring-8 Compact SASE Source, and is a high peak-brilliance soft X-ray free electron laser project for R&D aiming at realization of an angstrom X-ray laser facility. SCSS will provide six order of magnitude peak-brilliance enhancement compared to the current third-generation sources at 3 ~ 20 nm range.

Radiation Simulator

Real-time radiation simulator for Windows. To download, click right image and fill your information for the future announce. It is just single executable file: Radiation2D.exe. To run, double click. Grab the center electron, and try to move it. You will see radiation. Chose circle trajectory from Setup Menu, you will see synchrotron radiation.
Note:Linux and Mac version are also available!!

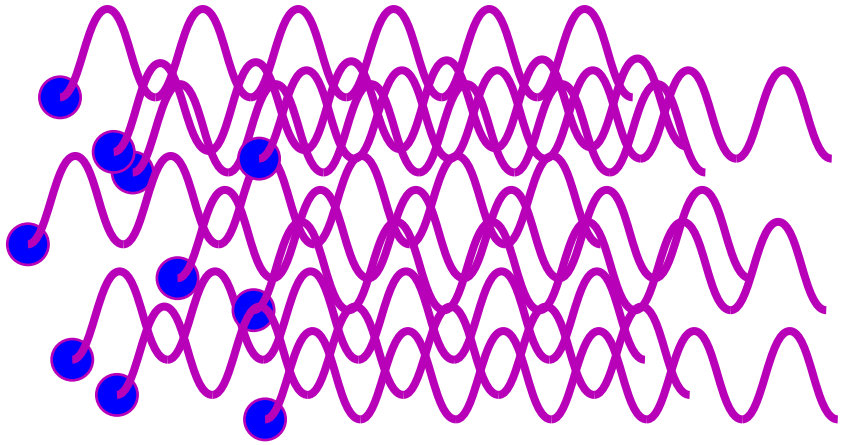
25/Jul/2003 The Radiation2D Ver. 2.0 for Windows was released.



From SR to FEL

SR or ERL

Spontaneous Radiation



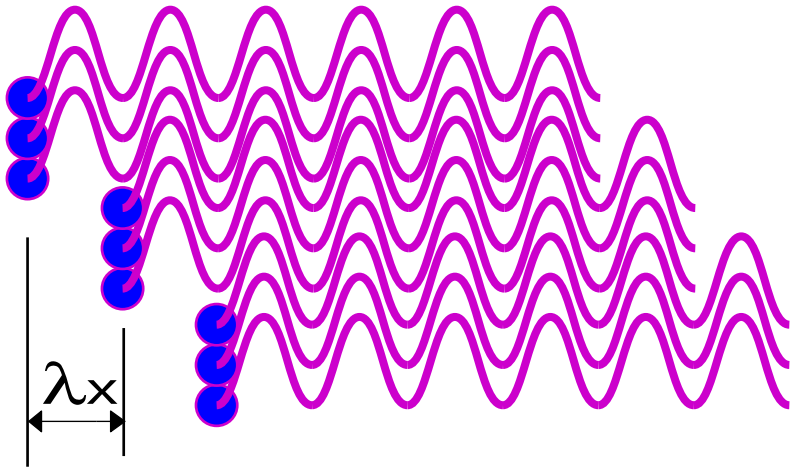
***N*-electrons**
random distribution

$E_{spt} \sim \sqrt{N}\, E_1$

$P_{spt} \sim N P_1$

FEL: Free Electron Laser

Coherent Radiation



***N*-electrons**
micro-bunched

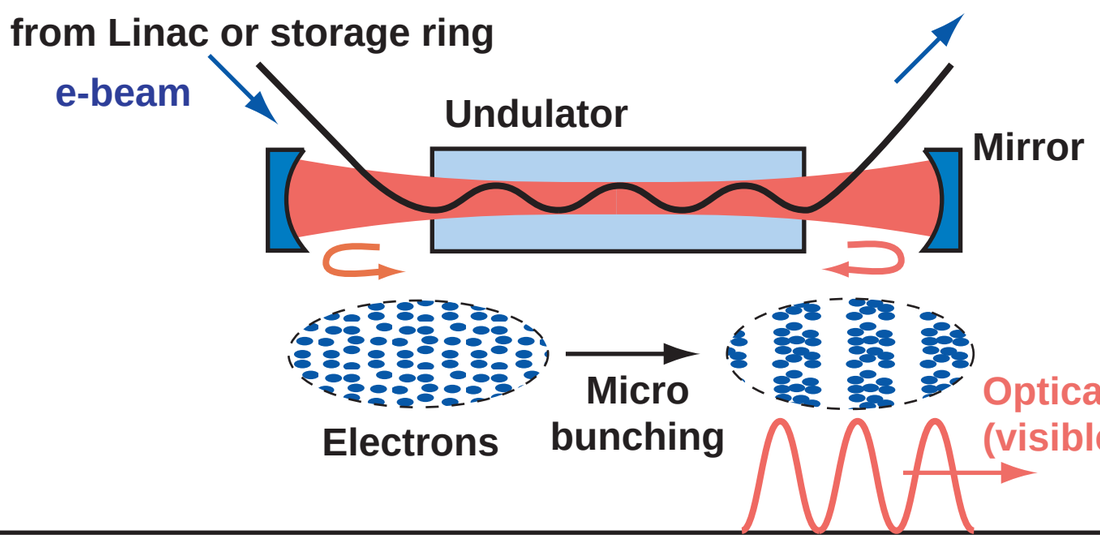
$E_{coherent} \sim N E_1$

$P_{coherent} \sim N^2 P_1$

Optical Power Enhancement

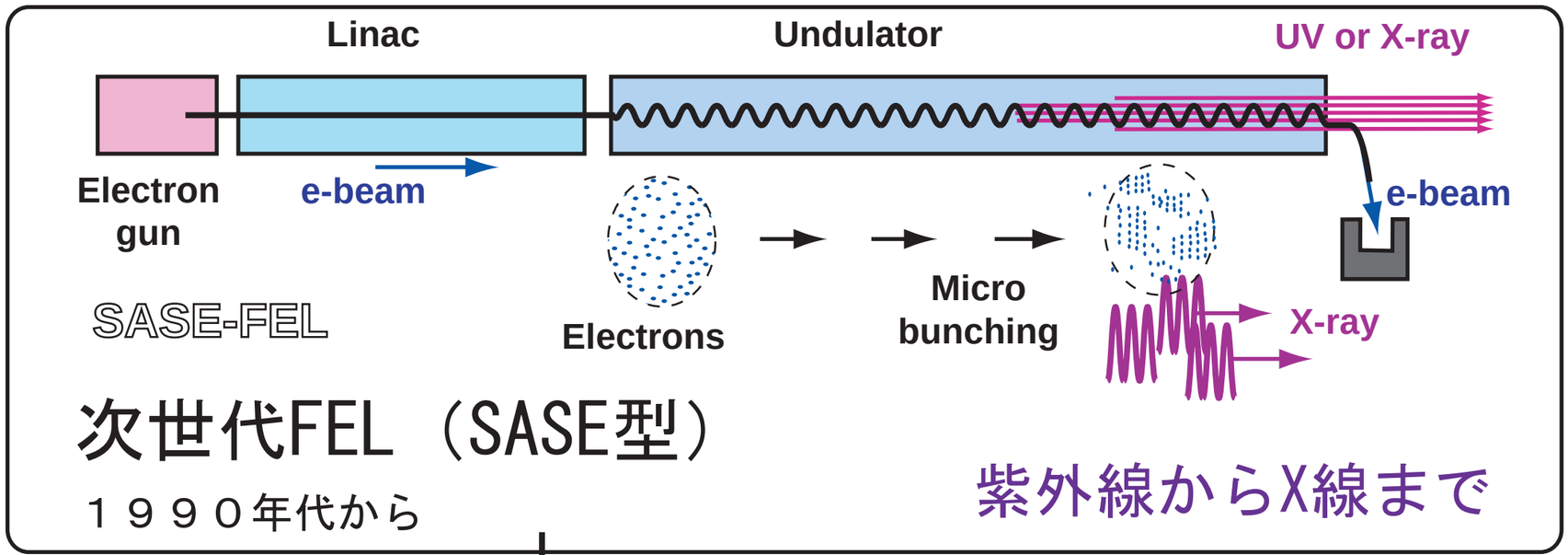
$\times 10^{5} \sim 10^{8}$

従来型FEL　ミリ波から赤外線、可視光まで



高品質電子ビーム
長尺＋高精度アンジュレータ

反射ミラーが不要！
短波長→X線へ



次世代FEL（SASE型）

１９９０年代から

紫外線からX線まで

X線FELを実現する技術　(高いレベルの要求あり)

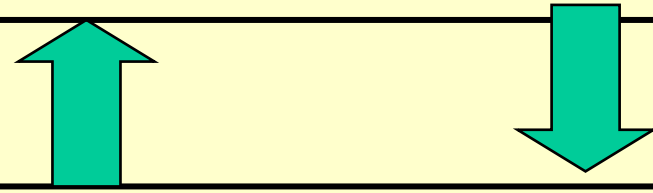
- **高安定電子源**
  - 高信頼性加熱方式→　高純度グラファイトヒーター (Si融解ヒーターの転用)
- **高安定加速**
  - 電磁ノイズ対策　→　シールドのカスタム設計
  - 温度変化を抑える　→　温度の高精度制御システム
  - 電源の安定か　　→　高精度パルス高圧源電源 (開発中：露光装置にフィードバック)
  - 高精度電圧モニタ　→　ppm精度の高電圧測定 (開発中：露光装置にフィードバック)
- **電子軌道の安定化**
  - 地盤が安定であること　→　播磨は岩盤 (自然が与えたる地の利)
  - アライメントシステム　(5um/10m)
    → マイクロ波共振器とレーザーアイリスの一体化
  - 架台の安定化　→　コージライトセラミック架台　(高精度加工機のベース)
    ＋　床研削装置　　(機器の高安定設置技術)
  - 各種の自動制御　→　ﾌｧｸﾄﾘｵｰﾄﾒｰｼｮﾝの活用 (PLC, FPGA)

- **残された課題**
  - 直流受電、配電システム　　(電気自動車向けバッテリを転用)
  - 光同期技術 (サブピコ秒、光通信技術の転用)
  - 加速器量産へ向けた、信頼性向上 (80セットの加速ユニット)
  - 土木基礎工事の再検討 (コンクリート収縮、日照による変形を抑える)
  - その他
  - サンプルのハンドリング技術、X線検出、高速データ解析、

産業界の技術の粋を結集して

産業界

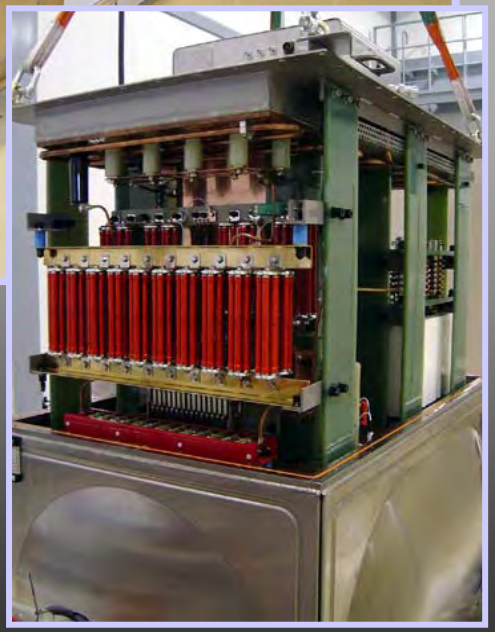
- セラミック産業、半導体製造装置、ディスプレイ製造関連、マイクロ波関連、電力制御関連、自動車産業、コンピュータ関連産業、環境機器、等々



ＸＦＥＬ建設

- 高純度金属材料、高純度非金属材料、永久磁石、エンジニアリングセラミック、 高精度加工、マイクロ波技術、超高真空技術、高電圧制御、ダイヤモンド加工技術、各種高精度センサー、コンピュータソフト、IGBT, PLC, FPGA, ADC, DAC, VME, OE-EO, ,,,,,,

Compact HV Pulse Modulator Supply



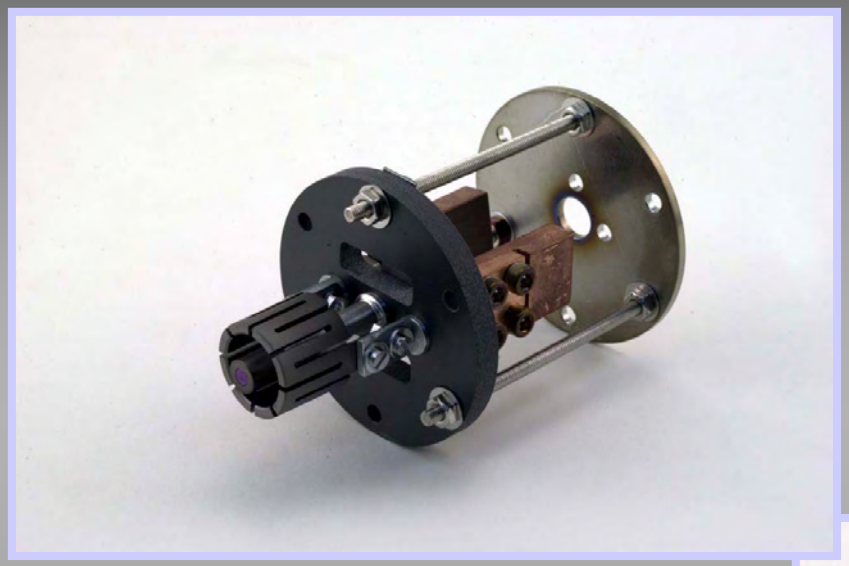
- Driving 50 MW klystron,
  and 500 kV electron gun.
- Compact, Oil Filled Design
  W 1.7 m x D 1.2 m x H 1m.
- Good EMI shield.
- Better cooling for HV component.
- Eliminating cooling air fan.
- No dust accumulation
  due to high voltage in air.
- No environmental effects:
  moisture and temperature variation.

Cavity-BPM (Beam Position Monitor)

Newly developed Cavity-BPM
For SPring-8 XFEL. 4.7 GHz.

- TM110 mode excitation amplitude provides very linear beam position information.
- Slot-coupling design isolates TM110 BPM signal from TM010 common-mode mixing, which cause position offset.
- Electrical center meets very accurately with mechanical center in a few micron-meter (insensitive to variation of cable length, or detection circuit details).

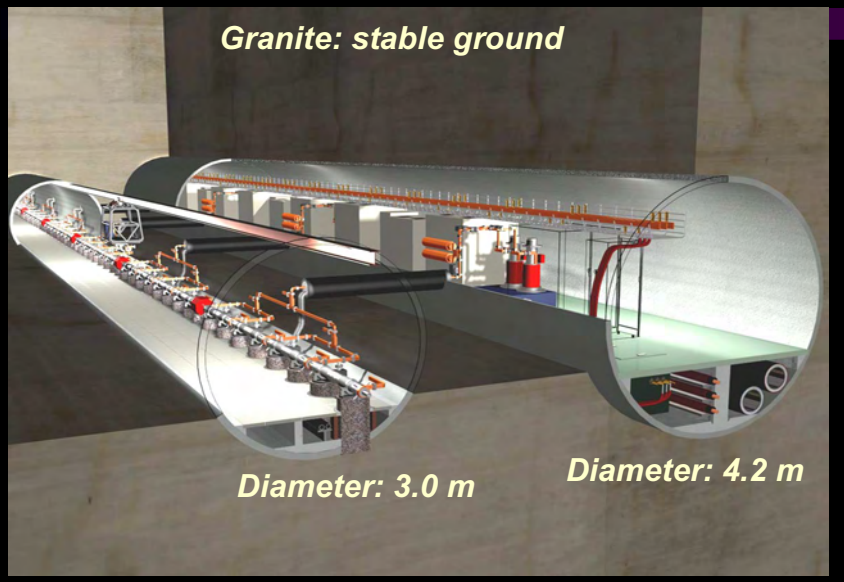
CeB_6 Cathode & Heater Assembly

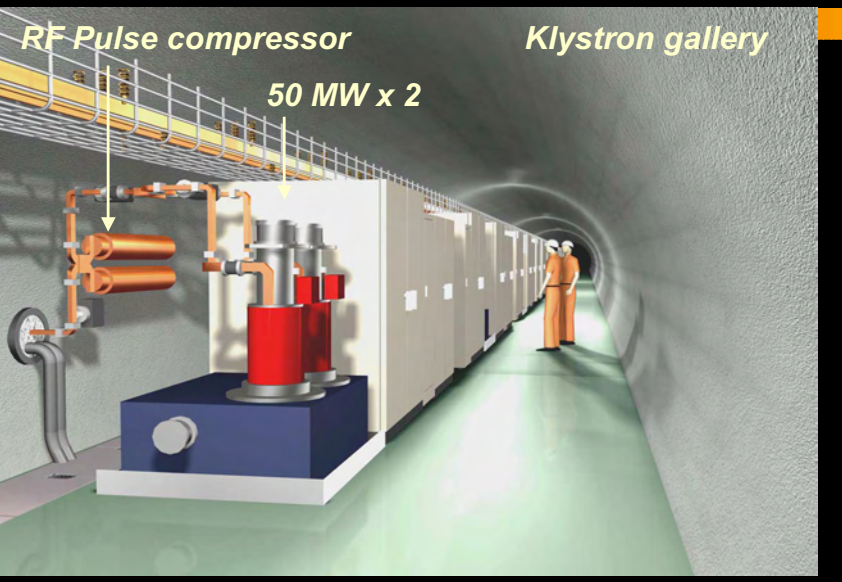


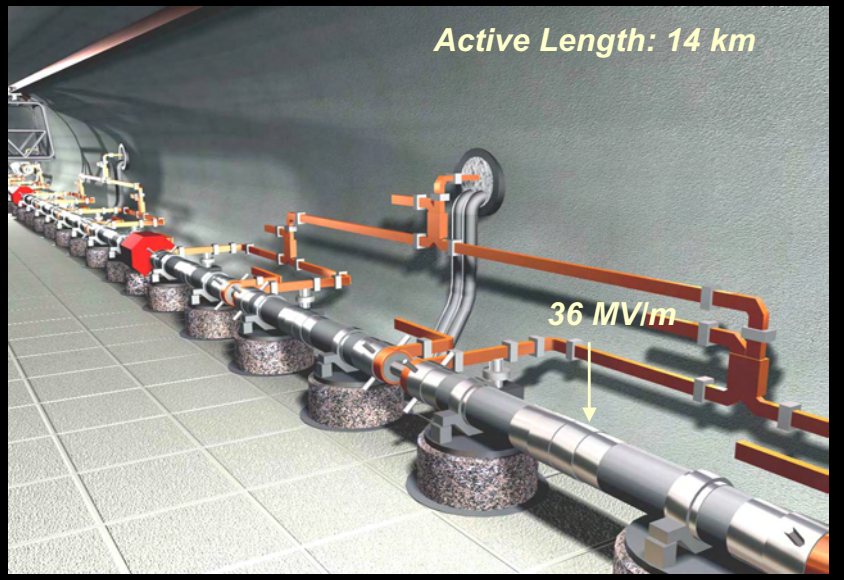
- CeB_6 Cathode 3 mm Diameter
- Emittance 0.4 π.mm.mrad
  (thermal emittance, theoretical)
- Beam Current 3 Amp. at 1450 deg.C
  (using graphite heater)
- Current Density > 40 A/cm^2

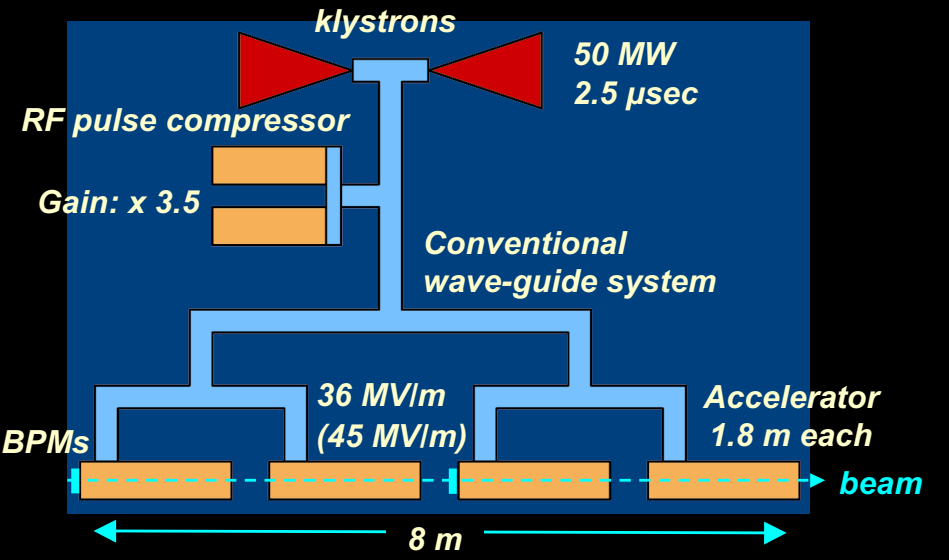
C-band SAMURAIs

JLC C-band (5712 MHz) Main Linac Tunnel









2002年、春　KEKから、Spring-8へ

C-band R&Dから、SCSS Projectへ

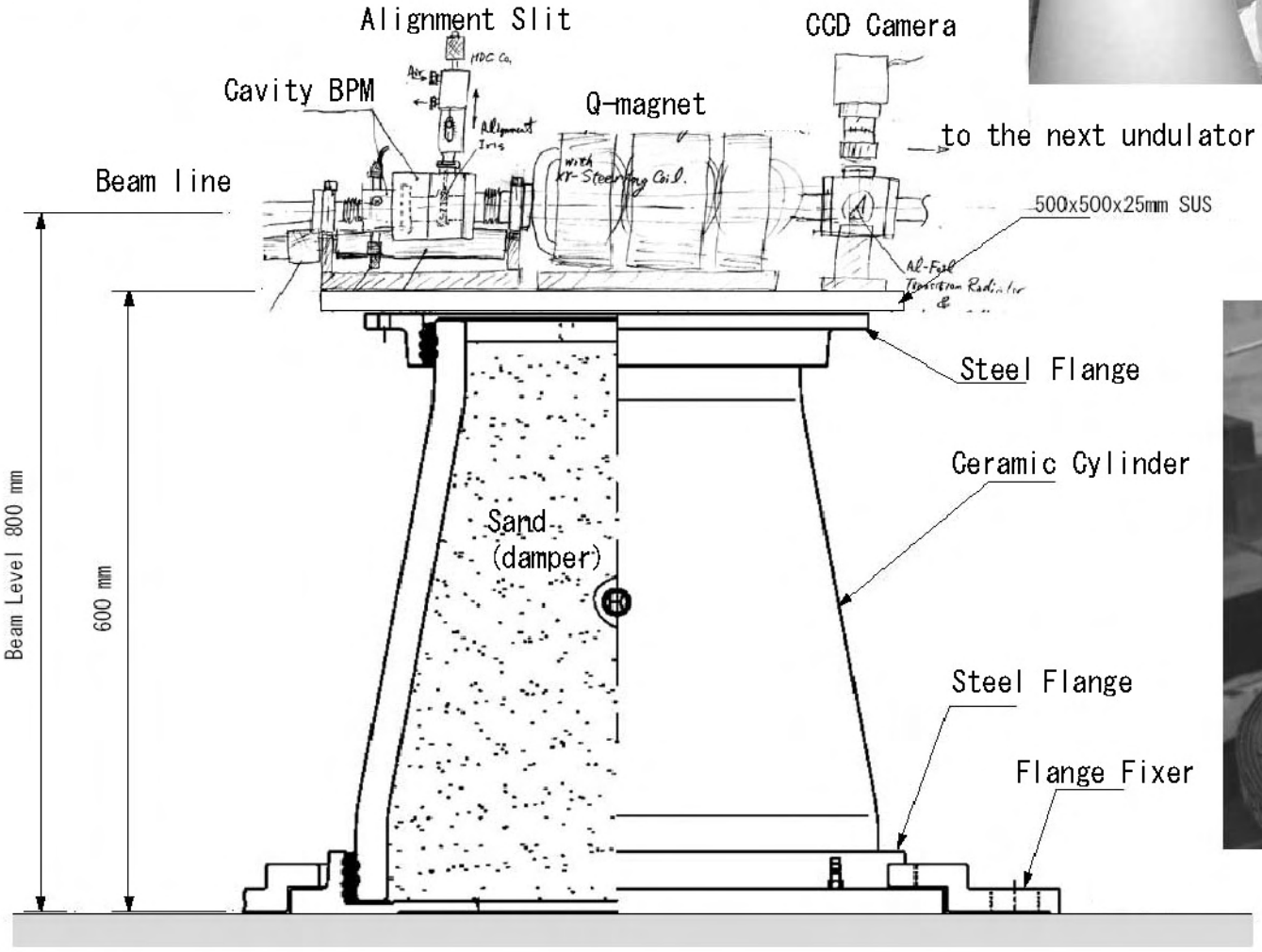
新竹は、長年努めた国家公務員を辞めた。

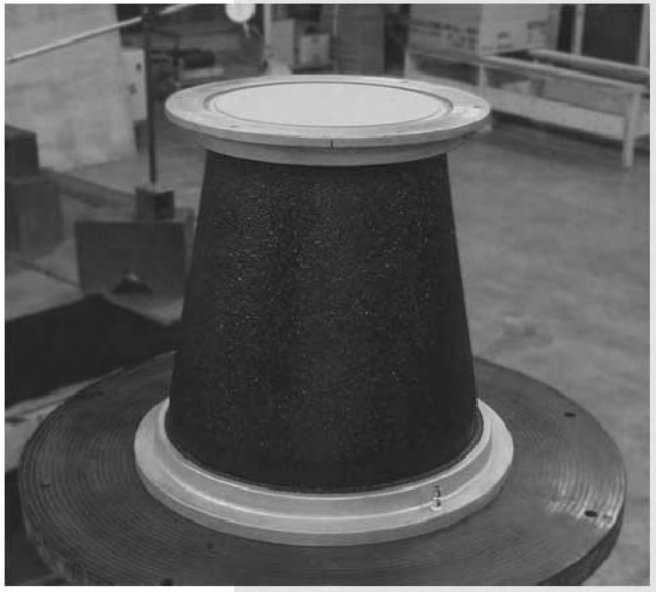
メーカーの団結は、未来を繋げていった。

Stable Support using Cordierite Ceramic

- Beam line level is designed low: 800 mm.
- Low thermal expansion cordierite is used.
- For stable positioning and lower vibration, No screw is used for position adjustment, but machining the spacer.
- Filled with sand for damper.

Cordielite Ceramic
before sintering





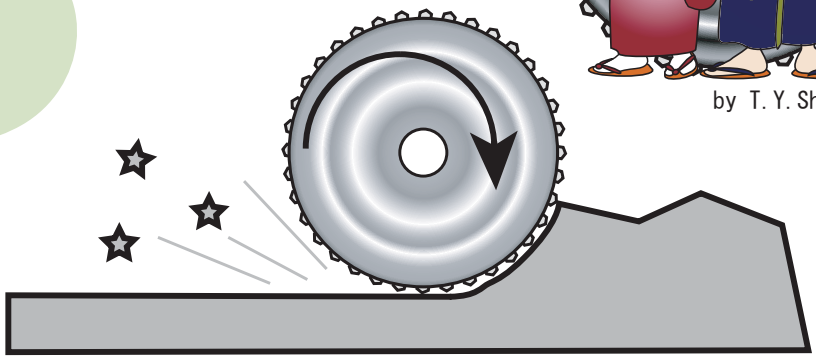
Ceramic Support using
Cordielite Ceramic

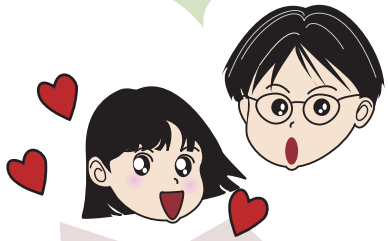
ゆかとけんさく

床研削装置

by T.Y.Shintake

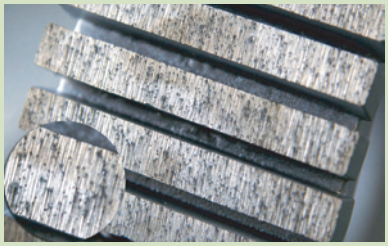
ダイヤモンドホイールで
コンクリートをガリガリ
削っちゃうぞー！





きゃぁ〜、
ダイヤモンド?!
どこどこ？

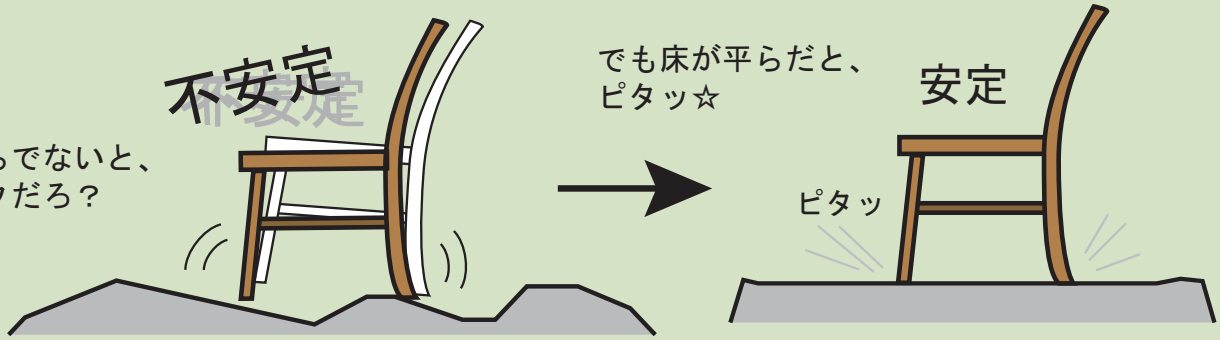
じぃ〜っ



ダイヤのつぶつぶが、
金属に埋め込まれて
いるんだ！

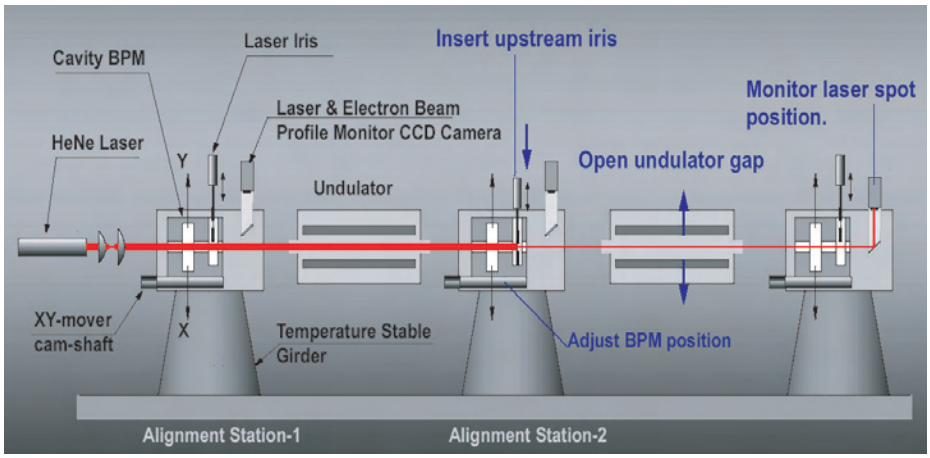
…でもどうして、
コンクリートの床なんか削るの？

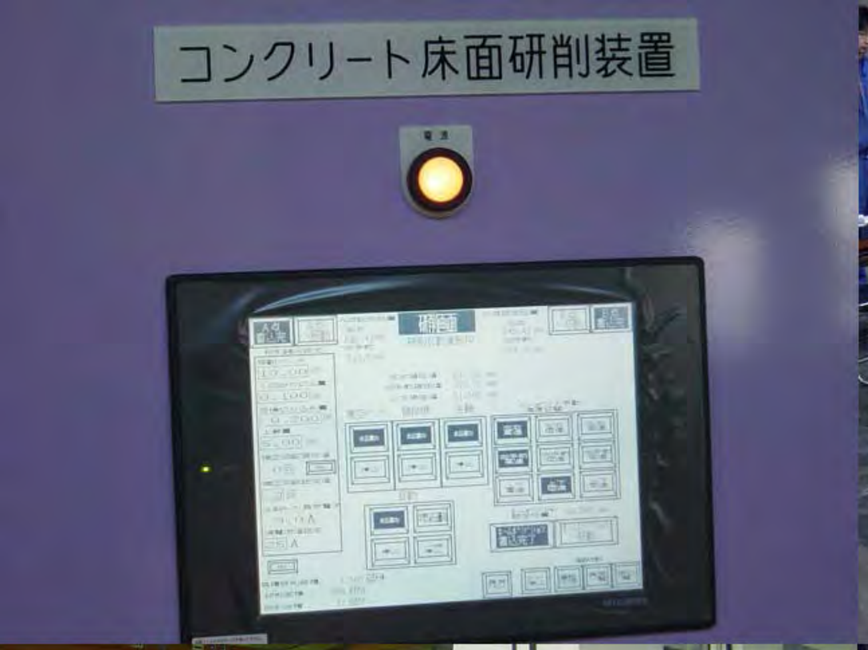
床が平らでないと、
ガクガクだろ？



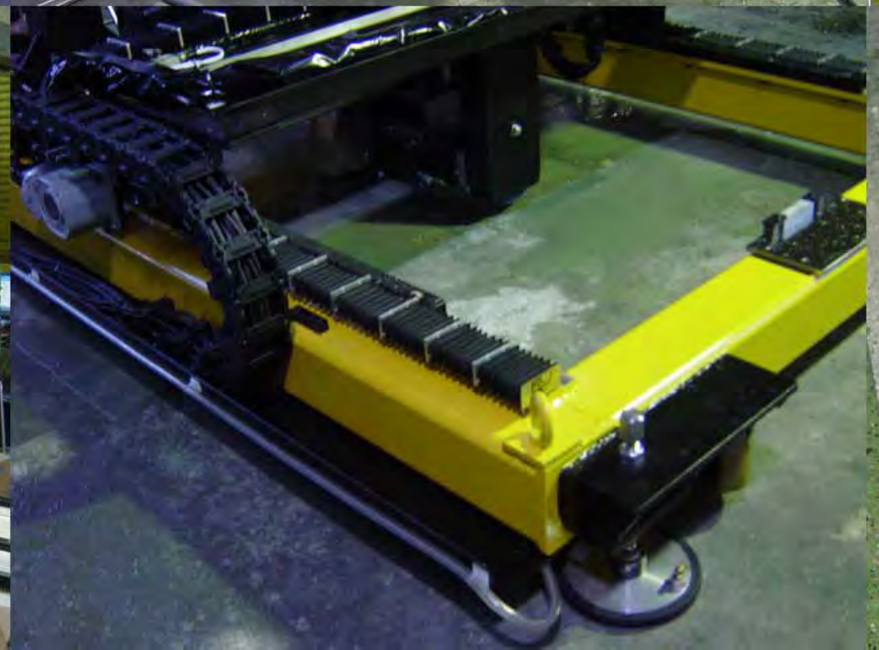
…それを
どこで使うの？

X線レーザーでは、
装置をとっても安定に
置く必要があるんだよ！



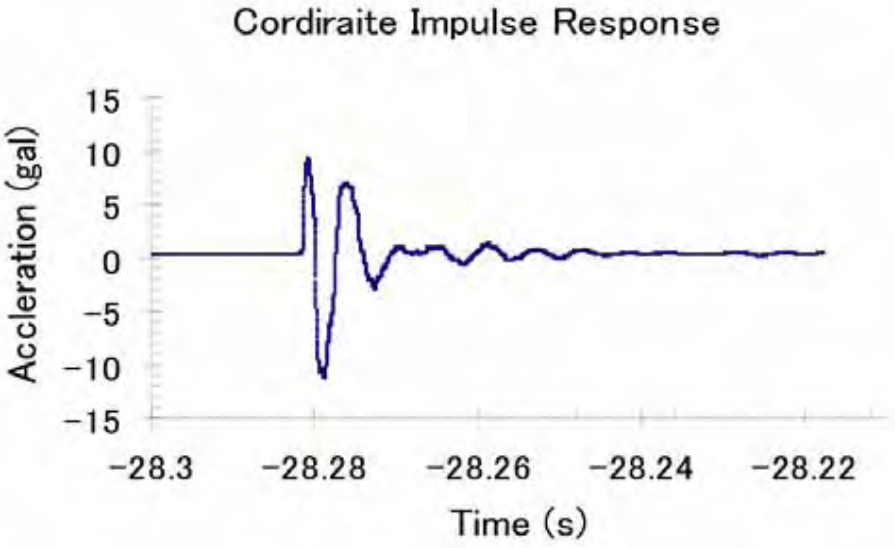

コンクリート床面研削装置

コンクリート床面研削装置

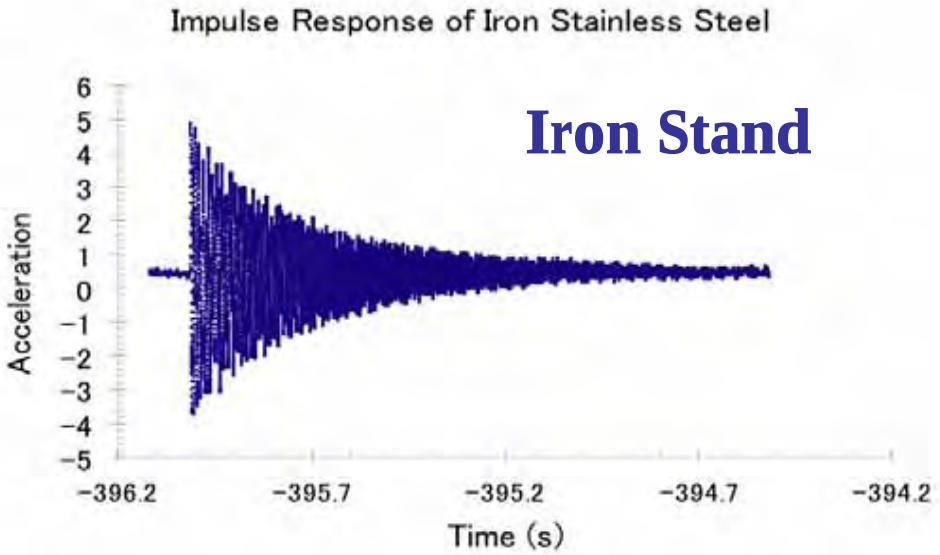


Impact Response of Cordierite & Iron Stand

Y. Otake



Cordierite



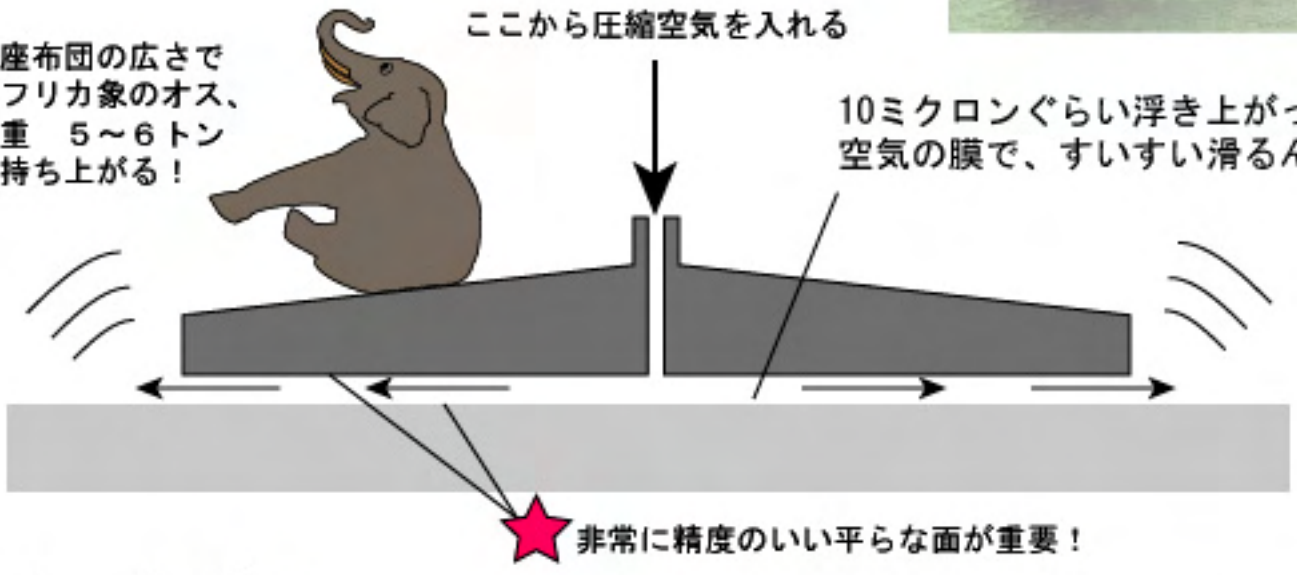
Iron Stand

エアーパッド

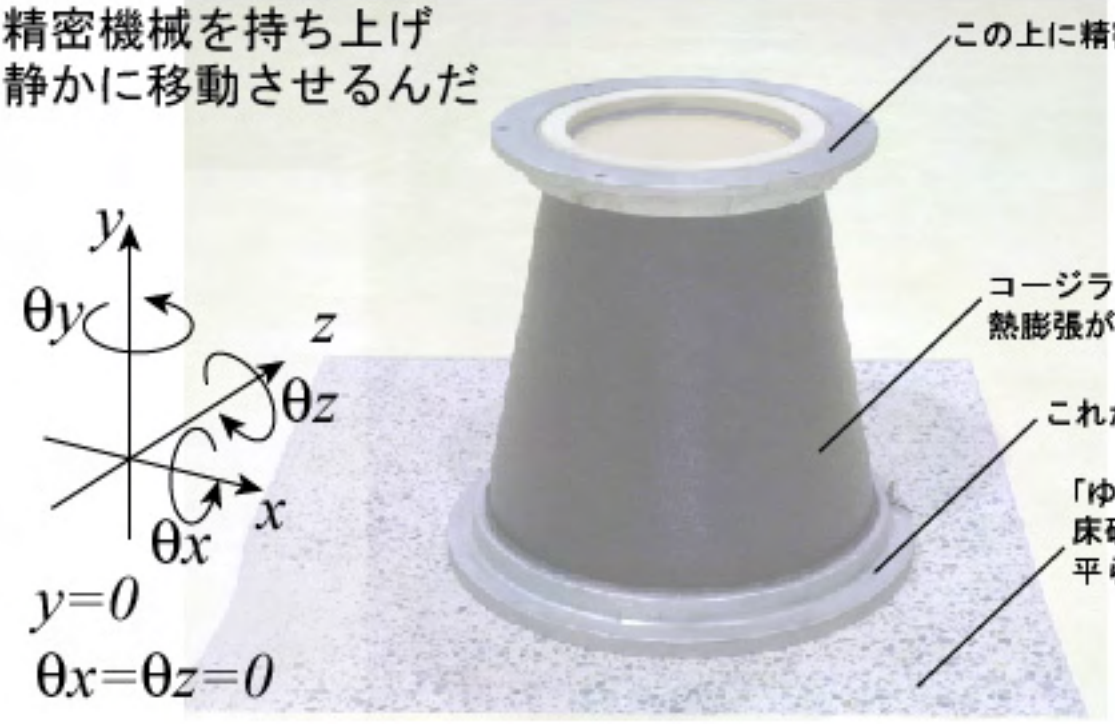
空気圧は力持ち！

5 kg/cm2 x 40cm x 40 xm = 5トン

友だちのホーバークラフト君



エアーパッドで
精密機械を持ち上げ
静かに移動させるんだ

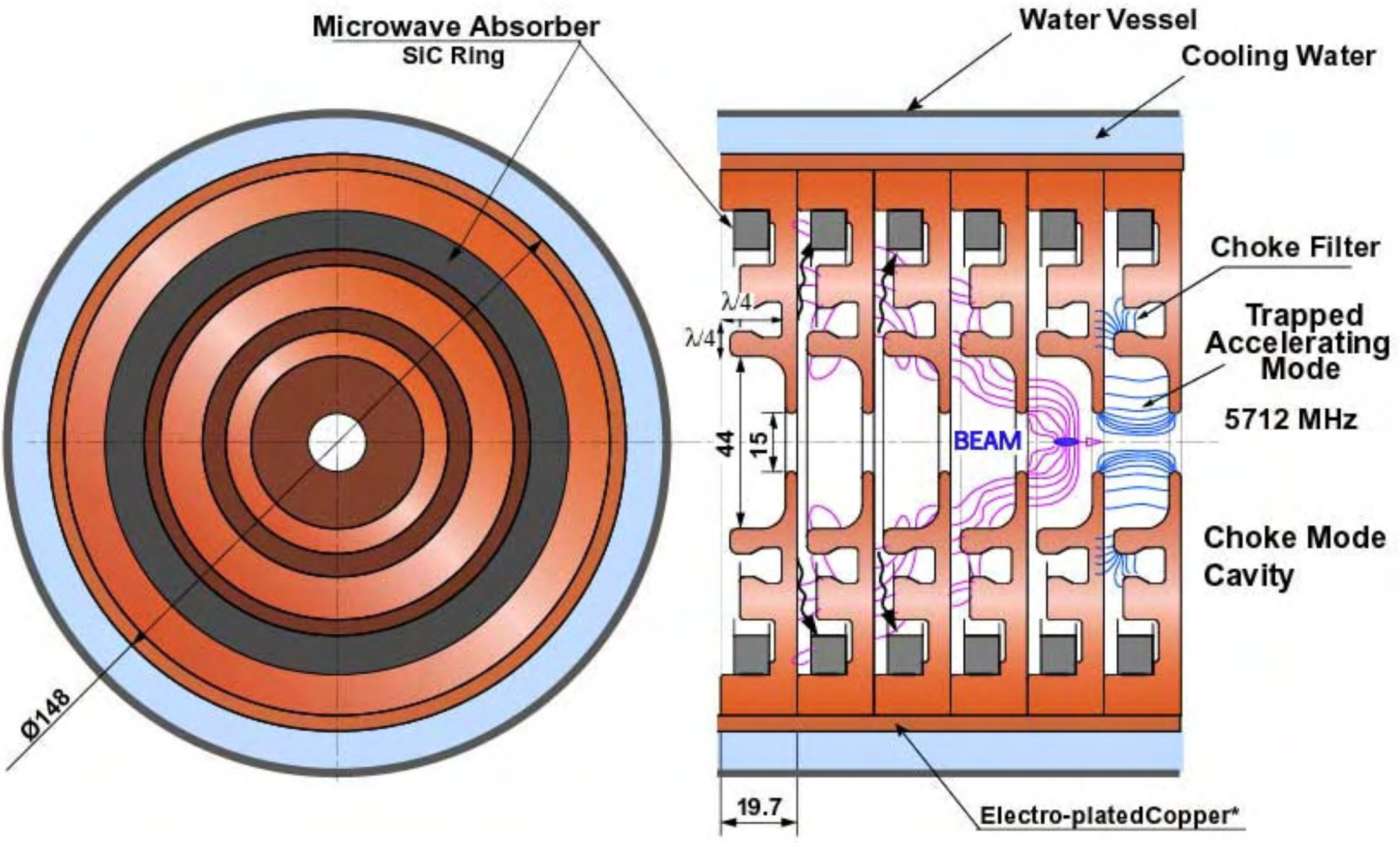


6自由度を3自由度に減らして
アライメントを容易に！

◎アライメント、位置合わせ
◎メンテナンスでの、重量物のスライド
◎フランジなど締め付け力の開放

宙に、浮いた。
「やりましょう。」と言った男が、２トンの鉄を上げてみせた。

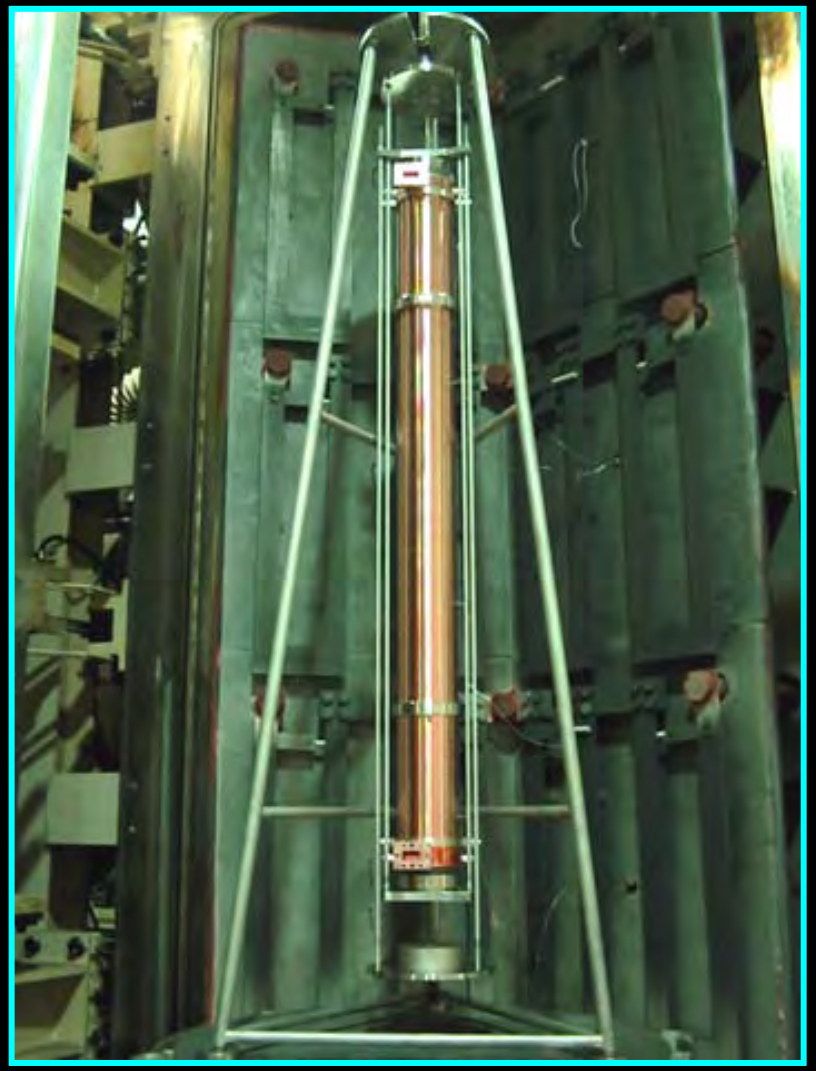
エアーパッドで
精密機械を持ち上げ
静かに移動させるんだ
y=0
θx=θz=0
◎アライメント、位置合わせ
◎メンテナンスでの、重量物のスライド
◎フランジなど締め付け力の開放


Microwave Absorber
SiC Ring
Water Vessel
Cooling Water
Choke Filter
λ/4
λ/4
Trapped
Accelerating
Mode
5712 MHz
44
15
BEAM
Choke Mode
Cavity
Ø148
19.7
Electro-platedCopper*

C-band Accelerating Structure for SCSS

X-ray FEL

Ver. 2002



- HOM Damping by Choke-Mode Cavity
- 1.8 m long, 91 Cells, CG-structure
- 3π/4-mode
- Brazing Bonding
- SiC by Tungsten wire-spring.
- Double-feed Coupler
- High-power test will be Summer 2003

魂を込めた、数ヶ月。みな、笑顔だった。

First International Review Committee for XFEL (SCSS) Project

Date & Time: February 3 (Thu), 2005 16:00～17:20
4 (Fri), 2005 16:00～17:00

(February 3rd, 2005)

9:00 - 9:15 Welcome Remarks: Yoshiharu Doi , Tetsutaro Iizuka
9:10 - 9:30 Executive Session: Hideo Kitamura
9:30 - 9:50 Project Strategy: Tetsuya Ishikawa
9:50 - 10:10 Accelerator Design Overview: Tsumoru Shintake
10:10 - 10:30 Break
10:30 - 10:50 FEL Machine Parameters: Takashi Tanaka
10:50 - 11:10 Start-To-End Simulation and Bunch Compressor: Toru Hara
11:10 - 11:30 Low Emittance Electron Source and Injector: Kazuaki Togawa
11:30 - 11:50 C-band Main Accelerator: Hiroshi Matsumoto
12:50 - 12:10 Undulator Line: Takashi Tanaka
12:30 - 14:00 Lunch
14:00 - 14:20 Alignment Strategy: Tsumoru Shintake
14:20 - 14:40 X-ray Beam Based Alignment: Takashi Tanaka
14:40 - 15:00 Control System: Ryotaro Tanaka
15:00 - 15:30 Break
15:30 - 15:50 Low level RF distribution and timing system: Yuji Otake
15:50 - 16:10 RF Vector Modulator/Demodulator R&D: Yuji Otake
16:10 - 16:30 Accelerator Tunnel and Radiation Issue: Xavier Marechal
16:30 - 16:50 Radiation resistance of undulator magnet: Teruhiko Bizen
16:50 - 17:20 X-ray Beam Line and Scientific Case: Tetsuya Ishikawa

(February 4th, 2005)

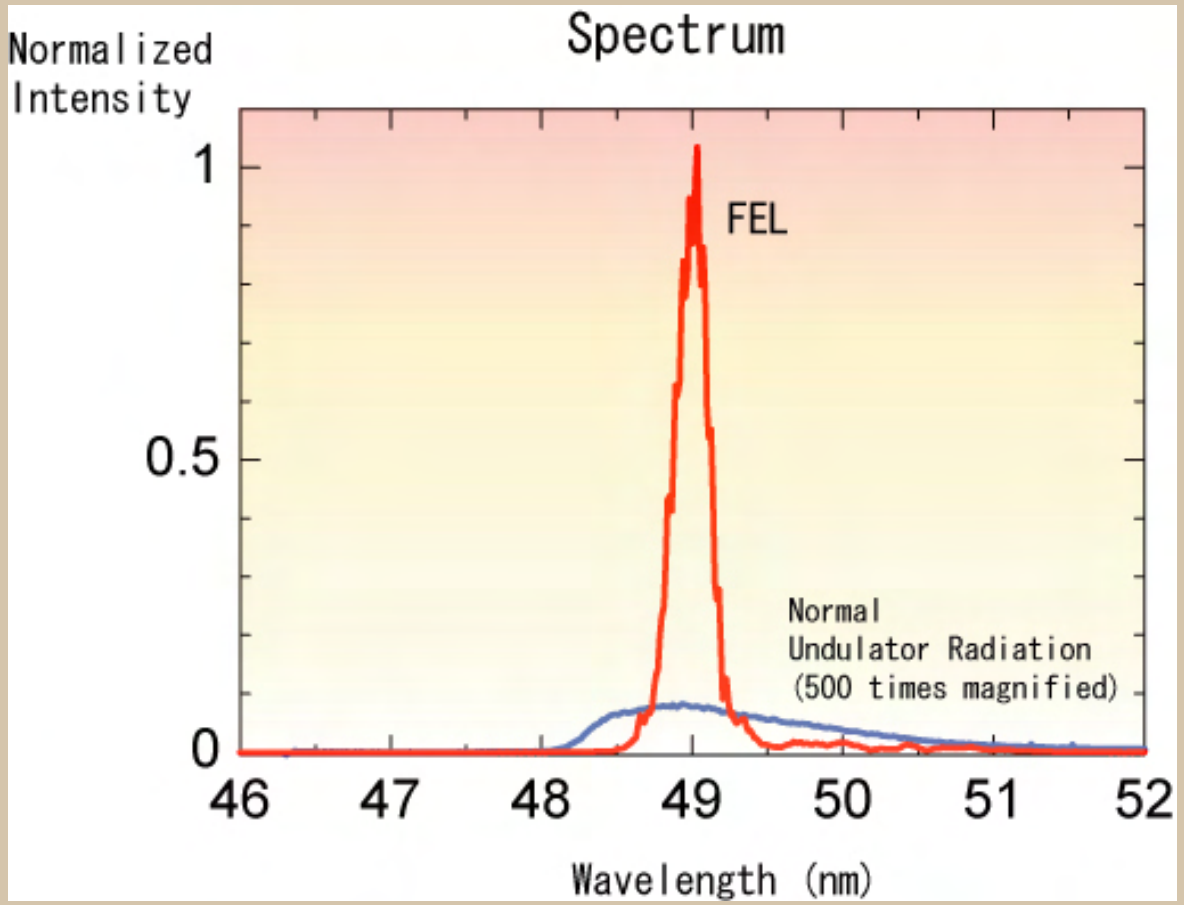
16:00 - 16:30 Summary from Review Committeee: Chair - K.J. Kim
16:30 - 17:00 Discussion and Closeout

試験加速器、アンジュレータとCバンド加速器

- Cバンド加速器
- クライストロン2本
- 加速管 1.8 m x 4本
- 250 MeV

- アンジュレータ　4.5 m x 2台
- 15 mm period
- 4 mm gap

最初のスペクトル



- **Wavelength : 49 nm**
- **E-beam energy : 250 MeV**
- **Bunch charge: 0.25 nC**
- **Bunch length: (< 1 pse)**
- **Peak Current (> 300 A)**

- **At moment spectrum width 0.5 nm is dominated by e-beam energy fluctuation ~ 0.2%.**

レーザー増幅をSCSSにて初めて観測。

June 15, 2006

8 GeV X線FEL建設

- 2006年～2010年　ＸＦＥＬ建設 (8 GeV, 0.7 Å)
  第3次科学技術基本法、国家基幹技術
  建設予算（加速器建屋、実験ホール、共用準備等含む）
  375億円

- 高輝度光科学研究センター（JASRI/SPring-8）と理化学研究所(RIKEN)との合同チームによる建設。

- ２０１０年のビーム運転を目指し、建屋設計、機器設計が進行中。