

## 「東北放射光施設構想」について

(東日本 → 東北に変更)

早稲田 嘉夫

東北大学(多元物質科学研究所)

### 2011.3.11大震災からの復旧は、最優先課題:

各大学・各部局の執行部等が懸命に対応し、災害そのものの解析、将来の災害に対する予知・防御などに貢献するプラスのプランを含めて、復旧に邁進している

東北経済が国内総生産に占める割合は高くはないが、東北地域は重要部品の生産工場が多く、我が国のみならず世界のサプライチェーンとしての機能が確認された

甚大な被災に同情は集まったが、リスク分散の視点からも、重要部品の生産拠点が、東北以外の地域に移動する傾向も現われた → 職場の減少 → **したがって、地域振興として根本的な対策が必要**

例えば、5年後の復旧完了後を見据えた施策、「ものづくり」拠点として**東北を着実に再機能させる復興策が重要**

そのためには、広範なイノベーション推進研究を強力に支援する「東北地区の拠点形成の実現」が不可欠 = 東北における科学技術・産業技術の革新的振興で、ものづくりの優位性維持と発展を図る と言う考え方が浮上した

研究者有志の議論の中で、基礎科学に立脚した物質・材料研究が、「ものづくり」の新たな展開を提供した例などが話題となり、拠点の中心に放射光源を据えると言う考え方が醸成された

世界的にみると、スイスのSLS、フランスのSOLEIL、英国のDIAMOND、中国上海のSSRF、オーストラリアのVICTORIA、スペインのALBAなど、「3GeVクラスの高輝度光源」、とくに、リング型光源の建設が積極的に行われ、供用が始まっている。

さらに台湾のTPS、米国のNSLS-II、スエーデンのMAX-VIの計画も進行中であり、「**中型リング光源の建設ラッシュ！**」

世界的な建設ラッシュの理由は、物質・材料、生命・バイオ、エレクトロニクス、エネルギーなど、広範な分野における新たなイノベーションを生み出すために不可欠な「最先端解析ツール」として、**放射光がもたらす「高輝度ナノビーム」の重要性・必要性が、認知された**からだと理解されている。

言い換えると、リング型高輝度光源は、多様な課題に対する利用ニーズに、一度に多数の機会提供を実現し、研究開発にソリューション与える「利活用の多様性と同時性」を兼ね備えているとの認識が、世界の常識になっている。

参考要因： 自らの経験による「放射光施設」利用のメリット  
→ 液体、水溶液、ガラス、薄膜などの構造解析、とくに、X線異常散乱の利用 → 技術者が長年の経験で保有していたノウハウの基礎科学的解明を達成 → **そのような基礎的情報に基づく「ものづくり」の新提案が可能になった**

我が国の現状は、**第4世代光源としてのERL計画**がPFの構想として進められているが、**中規模高輝度光源の建設に関する積極的な計画がない**。したがって、リング型光源では、2014年の台湾の新光源TPSの完成により、SPring-8ですら、アジアで最高輝度の地位をゆずることになる

今後、SPring-8のアップグレードなどにより、一部のマイナス要因はカバーできる可能性もあるが、とくに、中規模の高輝度光源を利用する広範な領域の産業技術分野のイノベーションの実現について、我が国が取り残されかねない状況であることが、徐々に衆目の一致するところとなりつつある

本計画は、そのような我が国が抱える研究開発の隘路を、一挙に打開するものである。合わせて東北の復興を着実に、長期的に後押しできるものである



図1-20 国内の放射光施設

放射光が解き明かす驚異のナノ世界

魔法の光が拓く物質世界の可能性

日本放射光学会編 講義社 2011年9月より

東北地区に放射光施設が空白という事実



将来発生が予測されている東南海沖地震などを考えると、リスク分散に繋がる

東北地区(最初から場所は決めず)に放射光施設設置を実現し、広範なイノベーション推進研究を強力に支援する拠点形成と位置づける。その結果科学技術・産業技術の革新的振興に基づいて、我が国のものづくりの優位性維持と発展に繋がる復興をはかる (これこそが復旧の次の施策)

東北地区にある七つの国立大学法人共同提案・協議を推進

国立大学法人 福島大学 学長 入野修先生(平成23年8月5日)

国立大学法人 岩手大学 学長 藤井克己先生(平成23年8月23日)

国立大学法人 秋田大学 学長 吉村昇先生(平成23年8月24日)

国立大学法人 山形大学 学長 結城章夫先生(平成23年8月29日)

国立大学法人 弘前大学 学長 遠藤正彦先生(平成23年8月30日)

国立大学法人 宮城教育大学 学長 高橋幸助先生(平成23年9月5日)

国立大学法人 東北大学 総長 井上明久先生(平成23年10月4日)

有志による検討を継続しつつ、放射光施設の専門家からの  
支援・助言を頂戴した



光源としての性能は、既存の最先端施設(例: SPring-8, PF)の6~7割程  
度の水準を確保しつつ、建設コストは約5分の一、建設期間約3年以内の  
「新時代中型高輝度放射光施設」構想を検討

例えば、実現すべき光量子光源の性能と条件

- ① 波長 : 0.1keV~20keV
- ② 輝度:  $10^{21}$ - $10^{22}$ p/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%B.W
- ③ 短パルス : 100fs
- ④ コンパクトで省エネな設計

有志によるユーザーなどの予備調査  
官・学 370件  
産業界 220件

専門家による建設予算の試算 → 概算 200億

- |                 |         |
|-----------------|---------|
| 1. 蓄積リング 2.5GeV | 小計: 48億 |
| 2. BTおよび入射部     | 小計: 2億  |
| 3. 入射器 2.5GeV   | 小計: 46億 |
| 4. 放射線安全        | 小計 4億   |
| 5. ビームライン 4億×8本 | 小計 32億  |
| 6. 建屋および受電設備    | 小計 68億  |
- (リング棟: 40億 入射器棟: 23億 受電設備等: 5億)

エネルギーの地産地消の導入を検討

必要な電気量	1.74 MW
加速器	1.10 MW
実験ホール	0.24 MW
空調	0.20 MW
冷却水	0.20 MW

リングおよび線型加速器の設置面積で太陽光で発電できる量を推定

総面積	約13500 m <sup>2</sup>
太陽パネル総発電量	1.62 MW @0.12kW/m <sup>2</sup>

このような過程で、東日本大震災に関する復興の補正予算、とくに第三次補正予算に潜り込ませたらどうかという強い意見が出された



有志・世話人の最終結論



この種の構想実現には、関連分野の専門家集団に趣旨説明をして、一定以上の意見交換することが極めて重要  
それをせずに、予算(中途半端な施設)が認められると、真の復興あるいは、我が国の関連分野における真の発展にプラスとなるか不透明になってしまう

これらが、本構想の立ち上げが、議論が始まって6ヶ月後の2011年12月になった理由

## 産業応用について (1)

最近のPFやSpring-8の成果でも、小さな試料、極微細領域測定などの実現によって、原子・分子レベルの情報、時間の関数としても明らかにできることが示されている

このような「物質・材料の基礎科学データ」に基づく、「科学的根拠に立脚したものづくりの実用化」できれば、韓国・台湾・中国等に簡単には追いつかれない我が国独自のものづくりの優位性維持と発展が実現できる

そのために、例えば 産業界のかかえる課題解決に放射光施設を積極活用できる体制を、東北地区7つの大学の研究者が支援する形で整備する とくに、放射光利用に基づくナノアプリケーションのルーチン化等で、産業応用への展開を容易にすることを含めて、構想する

もちろん、東北地区の機関を中心に既に活動している例もある

## 産業応用について (2)

予備調査 官学 370件 産業界 220件

試算：東北地区のみの産業界 1/3 利用でも 20%

各大学で広範なテーマで幾つものプロジェクトが展開されている

例1 高密度磁気記録媒体のナノレベル構造評価・磁気特性の解析  
 東北大学、秋田大学、弘前大学、NECTーキン、TDK、アルプス電気、本田精機

例2 レアメタル等の高純度化・省資源・リサイクルプロセスの確立  
 東北大学、秋田大学、岩手大学、宮教大、DOWA、秋田製錬、太平洋金属

例3 構造材料部材の局部残留応力精密解析・材料寿命評価  
 東北大学、岩手大学、東北特殊鋼、JFE条鋼、東北電力、新日鉄釜石、高周波鋳造

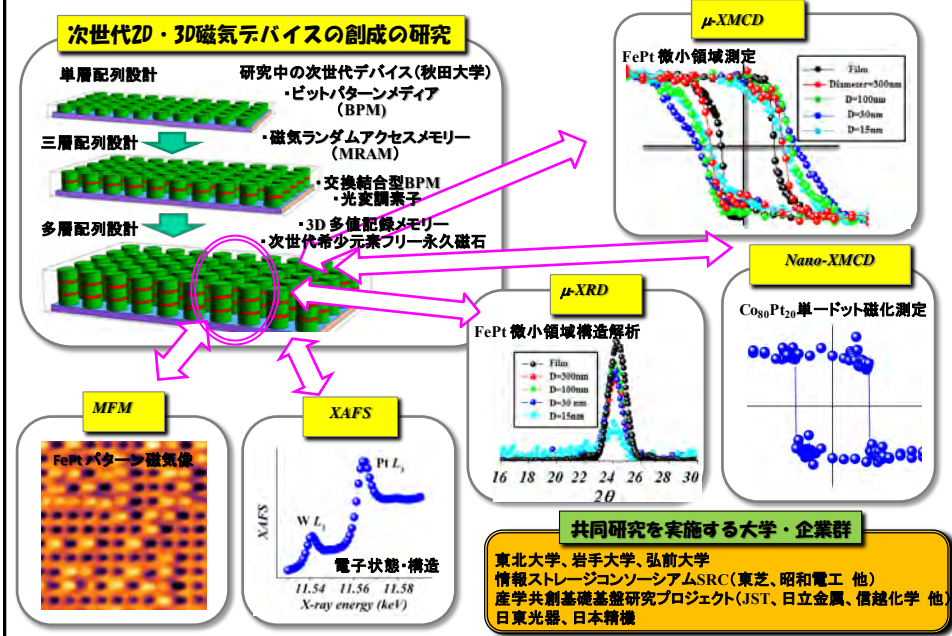
例4 新しい医薬品開発を加速するタンパク質構造の動的解明  
 東北大学、山形大学、弘前大学、秋田大学、医薬品企業

例5 低炭素・超ハイブリッド材料等の開発に係る基盤技術研究  
 東北大学、山形大学、福島大学、ユアテック、東北東ソー化学、東北化学薬品

(注：早稲田の責任で整理した内容)

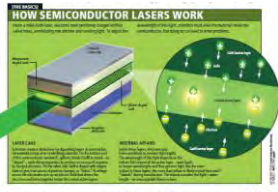
## 次世代磁気デバイス創成とナノ計測 (秋田大学・秋田産業技術センター)

—放射光マイクロビームを利用したナノ領域の磁気特性、結晶構造評価—

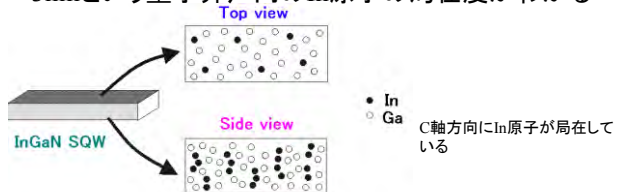
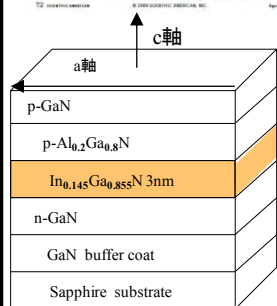


# InGaN 等のLED物質の局所構造と発光効率

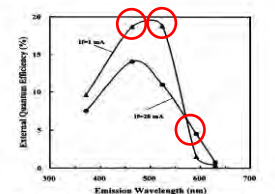
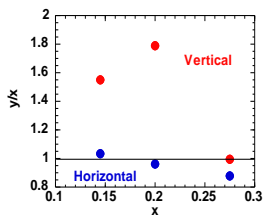
(弘前大学、東北大、岩手大、アイリスオーヤマ、旭化成等の企業)



偏光XAFSによる局所構造解析  
→ 3nmという量子井戸内のIn原子の局在度がわかる



In原子の局在度が発光効率と関係が見つかる



c-InGaN SQW

# 有機薄膜形成の素過程の解明

## 有機半導体デバイス

- 有機半導体材料の応用用途**
- 有機EL発光素子 (ディスプレイ、照明)
  - 有機トランジスタ (ICタグ用、ディスプレイ駆動用TFT、メモリ、センサー)
  - 有機薄膜太陽電池
- 特徴**
- フレキシブル (曲げられる)、柔らかい、軽い
  - 印刷で作製する電子素子、大面積、低価格、低温プロセス、環境低負荷
  - 自己組織化、生物模倣、分子素子 (高集積化) へ

## 有機電子デバイスの特性向上のために

- 界面の問題 (電極/有機半導体、絶縁層/有機半導体、p/n界面)
- 有機半導体層の結晶性の向上
  - 多形制御 (単相化)
  - 配向制御 (膜厚方向)
  - 面内配向の制御 (単結晶化)

薄膜形成初期過程の解明が重要!

## 放射光X線を使ったリアルタイム構造評価

The diagram illustrates the experimental setup for real-time structural evaluation using synchrotron X-rays. It shows the incident X-ray, scattering vector, and the detector (PIRATIS). The experimental setup includes a Be window, a shutter, and a base. The results show a 2D diffraction pattern and a plot of intensity (a.u.) versus  $Q_x$  (nm<sup>-1</sup>) for the in-plane structure.

## 共同研究体制

岩手大学、岩手県工業技術センター、東北大、山形大学、東北圏内電子材料、エレクトロニクス関連企業など



# 有機エレクトロニクス分野(有機EL/太陽電池/メモリー/Liイオンバッテリー)における高輝度放射光の利用

## 有機ELの特徴

- ・面発光体
- ・フレキシブルが可能

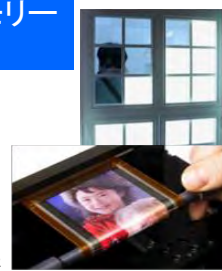
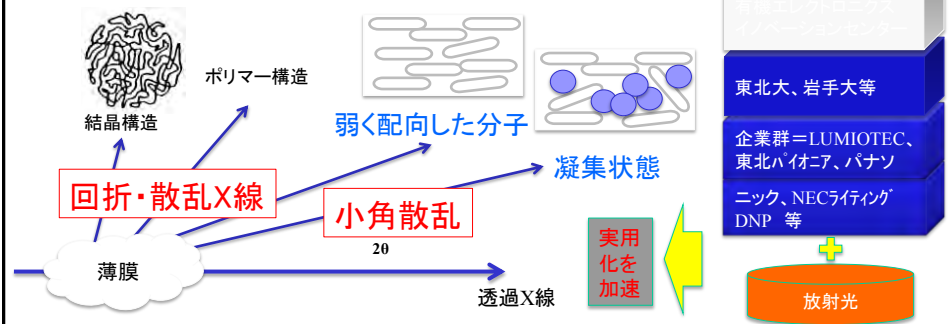
機能発現

有機薄膜が「アモルファス」

しかし・・・完全な無秩序ではない

- ・分子配向＝部分的な $\pi$ スタッキング → キャリア移動度に影響
- ・Emitter-HOST系混合膜における凝集 → 発光特性に影響

デバイス性能の向上 → 膜質の把握・定量化が最重要の課題



- 山形大学有機エレクトロニクス研究センター
- 有機エレクトロニクスイノベーションセンター
- 東北大、岩手大等
- 企業群=LUMIOTEC、東北バイオエ、パナソニック、NECライティング、DNP 等

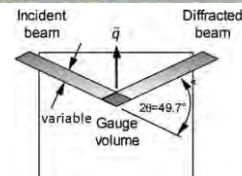
## 安全な構造体のために ＜非破壊残留応力評価のニーズ＞



### a) 各種構造体の残留応力評価:

材料や施工条件によって圧力容器の溶接部等に発生する複雑な残留応力や第二相の評価

右: 高強度SR微小ビームによる局部領域の残留応力評価

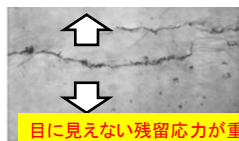


測定箇所を三次元的に走査し評価

### b) 鋼材表層の残留応力評価:

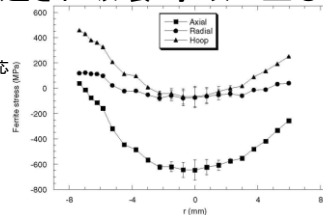
鋼材表層に引張応力が残ると、割れが促進され破壊・事故に至る

下: 引張残留応力により誘起される構造体表面の微小割れ



目に見えない残留応力が重要

右: SRを用いた非破壊X線回折により検出した鋼材表面の引張残留応力(欧州放射光施設ESRFによる測定例)



連携 東北大学、岩手大学：東北電力、JFE条鋼、新日鉄釜石、東北特殊鋼、高周波鋳造等

## 東北から世界へ発信する産学官イノベーション

**次世代エネルギー ライフサイエンス** ○○  
 弘前大学: 北日本新エネルギー研究所 パンフレットより  
 青森県産業技術センターHPより <http://www.aomori-itc.or.jp/pg/>

**次世代金属材料** ●○○  
 地域イノベーション戦略支援プログラムパンフレットより

**資源回収** ● **磁気記録技術** ●●  
 地域産学官共同研究拠点整備事業パンフレットより  
 JSTイノベーションサテライト 岩手HPより

**有機エレクトロニクス** ●○△ **バイオ** ●○○○  
 産学連携有機エレクトロニクス事業化推進センター  
 都市エリア産学連携促進事業パンフレットより

**マイクロシステム** ●●▲  
 東北大学マイクロシステム融合研究拠点HPより <http://www.rdceim.tohoku.ac.jp/vision.html/>

**次世代医療産業** ●○○○  
 地域イノベーション戦略支援プログラムパンフレットより

●: 地域卓越研究者戦略的結集プログラム(JST) ●: 先端融合領域イノベーション抽出拠点形成(JST)  
 ●: 地域イノベーション創出総合支援事業(JST) ○: 地域イノベーション戦略推進地域(MEXT)  
 ●: 産学共創基礎基金研究プログラム(JST) ○: 都市エリア産学官連携促進事業(MEXT)  
 ●: 地域産学官共同研究拠点整備事業(JST) ○: 地域イノベーション戦略支援プログラム(MEXT)  
 ○: 低炭素ネットワーク(MEXT)  
 ▲: 最先端研究開発支援プログラム(JSPS)  
 △: 各種NEDO事業

## 高輝度光量子光源が加速する東北発産学官イノベーション

**磁石材料**: 保磁力発生メカニズムを支配する電子状態を、結晶粒界スケールで解明する**ナノXMCD分析**  
 レアメタルの使用を大幅に低減した次世代高保磁力磁石開発

**構造材料**: 強度をもたらす原子結合力や、加工性をもたらす格子欠陥の挙動を電子結合論に解明する**ナノXRD分析**  
 安価で、軽量性・高強度・加工性を兼備した、次世代機能性材料の創成

**電池材料**: 電池活性・耐久性を左右する、電極・電解質材料のナノ構造を明らかにする**ナノXRD分析**  
 高性能・高耐久性を兼ね備えた、電池電極材料の開発

**電子材料**: 導電性、光物性、誘電率、超電導など諸電子物性を支配する電子状態を明らかにする**HAXPES分析**  
 ユビキタス元素の性質をフル活用した新機能電子材料創成

**触媒材料**: 有機合成において、活性触媒の遷移状態における電子状態を明らかにする**in situ ナノXAFS分析**  
 軽元素から構成される、次世代高活性触媒デザインの実現

**有機エレクトロニクス**: 電子輸送能力を左右する、分子配列構造を明らかにする**小角散乱分析**  
 フレキシブル・ディスプレイや、電子ペーパーなど次世代エレクトロニクスの実現

**環境分析**: 環境中微量元素の生体・環境影響を左右する化学形態を解明する**ナノXAFS分析**  
 汚染物質の移動・環境影響の高精度予測と的確な除染対策

**高分子材料**: 材料特性の鍵を握る、Å~μmの階層構造を明らかにする**散乱・回折分析**  
 安全安心かつサステイナブルな次世代軽元素材料の開発

**STIR center**

## 放射光利用バンク(仮称)の整備

例えば、東北地区にある7つの国立大学、公設研究所・センター等の研究者が、放射光利用に関する自らの得意分野を登録・連携して支援する



放射光利用に関するナノアプリケーションのルーチン化等を建設当初から積極的に導入する



企業が抱える種々の課題について、最先端の解析ツールである放射光利用を容易にすることによって、課題解決を図り、結果的に産業におけるイノベーションを促進させる

## 建設地・運営について

建設地、運営等は、本構想の実現が顕著になった時点で、本格的な検討を行うことと理解している。(建設地は、候補地に手を挙げてもらい第三者委員会で絞るコンペ方式を念頭の置いている)

運営体制として、例えばSpring-8で利用者支援を担当している「高輝度光科学研究センター」のような、あるいは同様の仕組みによる運営が参考とるなど考えている

幸い東北地方には、「東北6県+新潟県」の産官学が連携して東北地域全体の産業創出・ベンチャー支援を目的とする活動を行っている「インテリジェントコスモス機構(1989年設立:資本金84億円)」があるので、このような組織を活用することも1つの(案)だと思っている

## 東北地区にある七つの国立大学法人共同提案・協議を推進

国立大学法人 福島大学 学長 入戸野修先生(平成23年8月5日)

国立大学法人 岩手大学 学長 藤井克己先生(平成23年8月23日)

国立大学法人 秋田大学 学長 吉村昇先生(平成23年8月24日)

国立大学法人 山形大学 学長 結城章夫先生(平成23年8月29日)

国立大学法人 弘前大学 学長 遠藤正彦先生(平成23年8月30日)

国立大学法人 宮城教育大学 学長 高橋幸助先生(平成23年9月5日)

国立大学法人 東北大学 総長 井上明久先生(平成23年10月4日)

国立大学法人 東北大学 次期総長候補者 里見 進先生(平成24年2月14日)

国立大学法人 宮城教育大学 次期学長候補者 見上一幸先生(平成24年2月5日)

国立大学法人 弘前大学 学長 佐藤 敬先生(平成24年3月8日)

東日本省エネ・イノベーション支援型放射光施設構想

English Home

はじめに

構想について

概要

経緯

東北放射光施設検討会(有志)

設備の概要

東日本放射光施設構想

in English

Mail

Light Source in East Japan  
-The STIR 3GeV-SR Center-

Promotion of Construction of the  
Synchrotron Radiation Facility  
in Tohoku Area  
<http://res.tagen.tohoku.ac.jp/~waseda/STIR/STIR.html>

CRINT -Hirosaki University-  
Center for Research and Innovation in North-  
Tohoku Area

View of ESRF (France)

The STIR 3GeV SR Center in East Japan

<http://www.mech.hirosaki-u.ac.jp/~furuya/SRSite/>

東北地区にある7つの国立大学の力を結集させて  
東北地区に広範なイノベーション推進研究を強力  
に支援する拠点形成をぜひ実現したい



それによって、東北地方およびその周辺地域での  
震災復興および科学技術・産業の革新的振興を基  
礎科学の裏付けと融合によって達成し、我が国の  
ものづくりの優位性維持と長期的かつ着実な発展  
に活用したい

ご協力とご支援をお願いします

STIRC  
Science, Technology, Innovation & Reconstruction Center

# 東北放射光計画

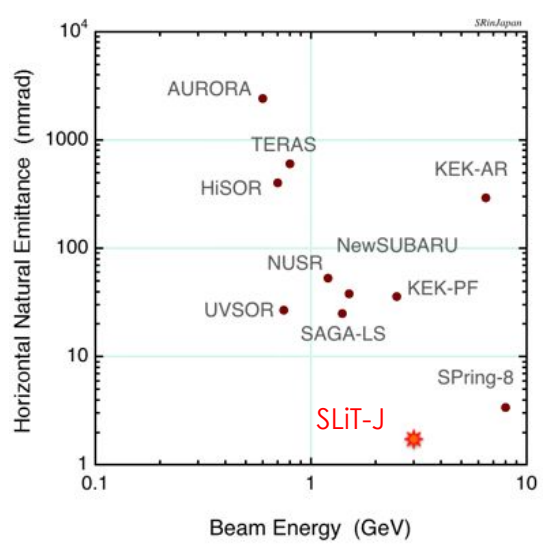
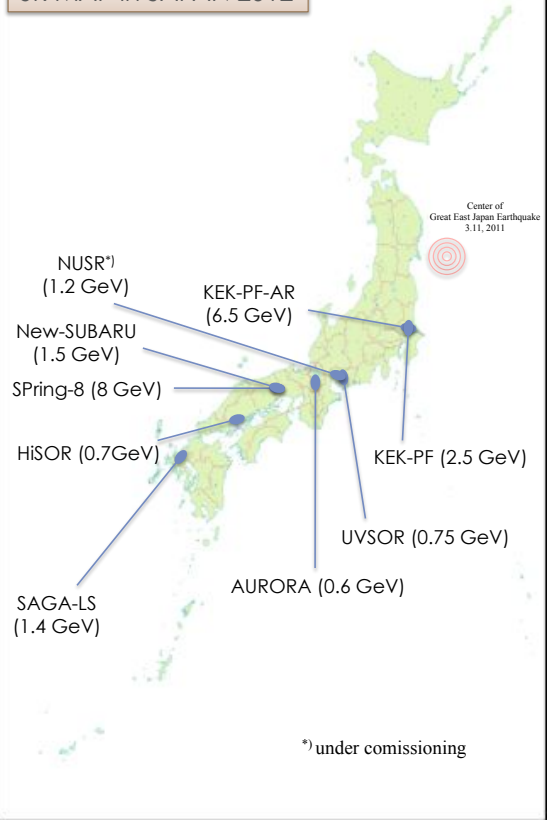
## Synchrotron Light in Tohoku, Japan (SLIT-J) Conceptual design of accelerator complex v1.2

2012.5.7

Hiroyuki Hama  
Toshiya Muto  
Fujiuo Hinode  
with Beam Physics G.  
Electron Light Science Centre  
Tohoku University



SR MAP in JAPAN 2012



**An advanced low emittance 3 GeV machine for X-ray should be established in Tohoku, Japan.**



## 目標とする光源施設のコネプト

- 1 軽元素から比較的軽い中重元素の分析に不可欠なエネルギー領域をカバー
- 2 挿入光源の完全な偏光制御およびナノ集光ビームによる超高分解能X線観測を可能にする低エミッタンス光源
- 3 ナノ領域の物質構造・機能を鮮明に観察する高輝度光源
- 4 化学反応、相転移のリアルタイム分析を可能にする超短パルスX線
- 5 光源性能を最大限発揮できる加速器運転
- 6 低コストかつ省エネルギーな光源施設

●

●2

## 本邦の高水準な加速器科学技術の活用

我が国で、加速器および放射光分野で長年培われ蓄積され、また開発された最先端科学・技術を駆使して、短期間で最新の第三代放射光源と同水準あるいはそれ以上の高い光源性能を持つ放射光研究施設を東北地方に建設する。

- ①高輝度放射光光源における高性能機器の設計・製作
- ②高輝度電子源
- ③C-band 線型加速器
- ④真空封止型短周期アンジュレータと磁場測定技術
- ⑤高耐熱性分光器等光学素子
- ⑥高精度アライメント
- ⑦MADCOCA制御システム
- ⑧高精度加工・製造技術等

.....



確立した最新の加速器科学の物理とテクノロジーを集積する、  
先端的でありながら信頼性・安定性の高いコンパクトで  
省エネ型光源加速器システム

●

●3

●真空封じ短周期アンジュレータを活用

$$\begin{array}{l} \lambda_u = 15 \text{ mm} \\ B_0 = 1.5 \text{ T} (K \sim 2.1) \Rightarrow \begin{array}{l} \epsilon_{\text{photon}}^{\text{1st}} = 2.8 \text{ keV} \\ \epsilon_{\text{photon}}^{\text{7th}} = 19.6 \text{ keV} \end{array} \\ E_e = 3 \text{ GeV} \end{array}$$

3 GeVクラスでも、20 keV付近までのX線領域をカバーできる  
そのためには、

- ⇒ 低エミッタンスビームの実現  
輝度を上げるための極端に長い直線部の必要性は、かつてより少ない  
口径が小さい電磁石 → 構成機器やリングそのもののコンパクト化
- ⇒ 基盤技術の成熟と進化  
高度化したITや通信技術がフレキシブルな加速器制御を実現する  
超高精度工作技術が品質の高い機能複合型電磁石の製作を可能にした  
→ 機能複合型電磁石の積極的利用でリングのコンパクト化

低エネルギー&低エミッタンスによる高輝度化は  
低コスト・省エネ化へも直接的に連結する

● 4

## 世界の光源性能目標の考え方

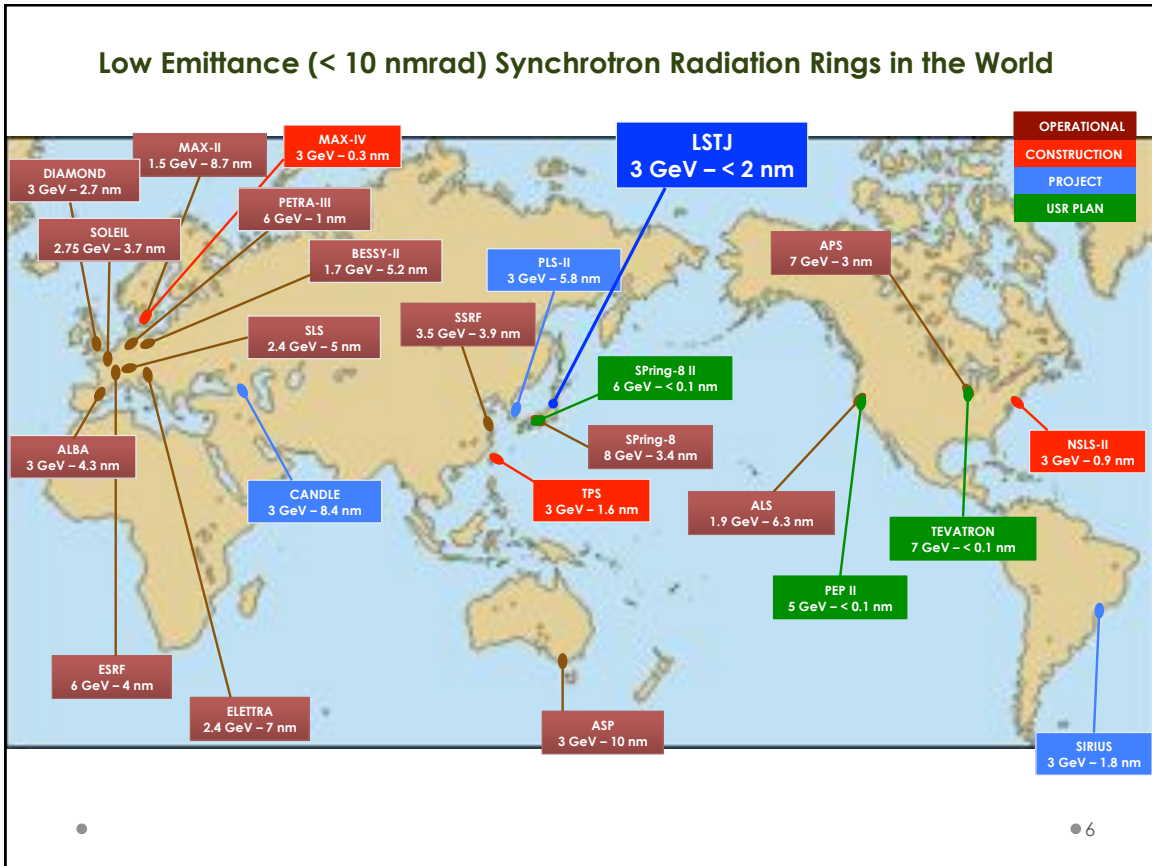
Summary of NSLS-II Source Properties  
User Workshop July 17-18, 2007

- NSLS-II is designed to deliver photons with average spectral **brightness** in the 2 keV to 10 keV range exceeding  **$10^{21} \text{ph/mm}^2/\text{mrad}^2/\text{s}/0.1\text{bw}$** .
- The spectral **flux** density should exceed  **$10^{15} \text{ph/s}/0.1\text{bw}$**  in all spectral ranges.
- Very **high-current** electron beam ( $I = 500 \text{ mA}$ ) with **sub-nm-rad** horizontal emittance (down to 0.5 nmrads).
- **Diffraction-limited vertical emittance** at a wavelength of 1 Å (~ **8 pmrad**).
- The electron beam will be **stable** in its position (**<10% of its size**), angle (**<10% of its divergence**), **dimensions (<10%)**, and **intensity (< 0.5% variation)** to provide for **constant thermal load** on the beam-line front ends.

SPring-8がカバーするX線領域より、低いエネルギー(軟X線)領域  
でこれに匹敵する光源は国内に存在しない

● 5





### 東北放射光源の性能目標

**利用可能波長域**                    20 eV ~ 70 keV  
**最大輝度 (1 - 10 keV)**        ~ 10<sup>21</sup> phs/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%b.w.

#### マシンスペックの目標

<b>基本構成</b>	3GeV蓄積リング+3GeV入射器+高輝度電子源	
<b>蓄積リング</b>	ビームエネルギー	3 GeV
	エミッタンス	1 ~ 2 nmrاد
	ビーム電流	300 - 400 mA
	周長	< 300 m
	パルス長	< 20 ps
<b>入射器</b>	加速器タイプ	C-バンド線形加速器
	エネルギー	3 GeV (full-energy inj.)
	電子源	先端的高輝度電子 (規格化エミッタンス ~ 1mmrad)

(そのほかに念頭におくこと)

- レーザースライスや低α運転などによるフェムト秒短パルスX線
- トップアップ運転
- 入射器を活用した高品位なシード型軟X線FELの可能性

# 高輝度へのアプローチと光源設計の戦略

## 輝度 (brilliance)

$$Brilliance = \frac{dN_{photon} / dt}{4\pi^2 \sigma_x \sigma_{x'} \sigma_y \sigma_{y'}} \left( \frac{\Delta\omega}{\omega} \right) \text{ (ph/s/mm}^2\text{/mrad}^2\text{/0.1\%bw)}$$

電子ビームが占める横方向位相空間の面積

蓄積リングでは

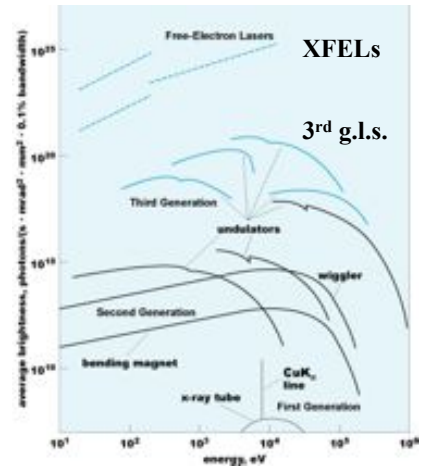
$$\sigma_x \sigma_{x'} \propto \epsilon_x \quad \epsilon_{x0}; \text{ 水平 (自然) エミッタンス}$$

$$\sigma_y \sigma_{y'} \propto \epsilon_y \quad \kappa; \text{ 水平-垂直結合定数}$$

$$\epsilon_x = \frac{\epsilon_{x0}}{1 + \kappa}$$

$$\epsilon_y = \frac{\kappa \epsilon_{x0}}{1 + \kappa}$$

$$Brilliance \propto \frac{I}{\epsilon_x \epsilon_y} \quad I: \text{ビーム電流}$$



## エミッタンスを如何に下げるか

$$\epsilon_{x0} = C_q \gamma^2 \frac{\oint H / \rho^3 ds}{\oint 1 / \rho^2 ds - \oint (1 / \rho^2 + 2K) \eta_x / \rho ds}$$

$$H = \gamma_x \eta_x^2 + 2\alpha_x \eta_x \eta_x' + \beta_x \eta_x'^2$$

$$C_q = (55/32\sqrt{3}) \hbar / mc = 3.83 \times 10^{-13} \text{ (quantum constant)}$$

## ● 理論的最小エミッタンス

Theoretical minimum emittance

$$\epsilon_x^{\min} = \frac{1}{4\sqrt{15}} \frac{C_q \gamma^2 \theta^3}{J_x} \text{ (achromat)}, \quad \epsilon_x^{\min} = \frac{1}{12\sqrt{15}} \frac{C_q \gamma^2 \theta^3}{J_x} \text{ (non-achromat)}$$

$C_q = 3.83 \times 10^{-13}$  (mrad)

$\theta$ ; bending angle (rad)

$J_x$ ; horizontal damping partition ( $\sim 1.5$ )

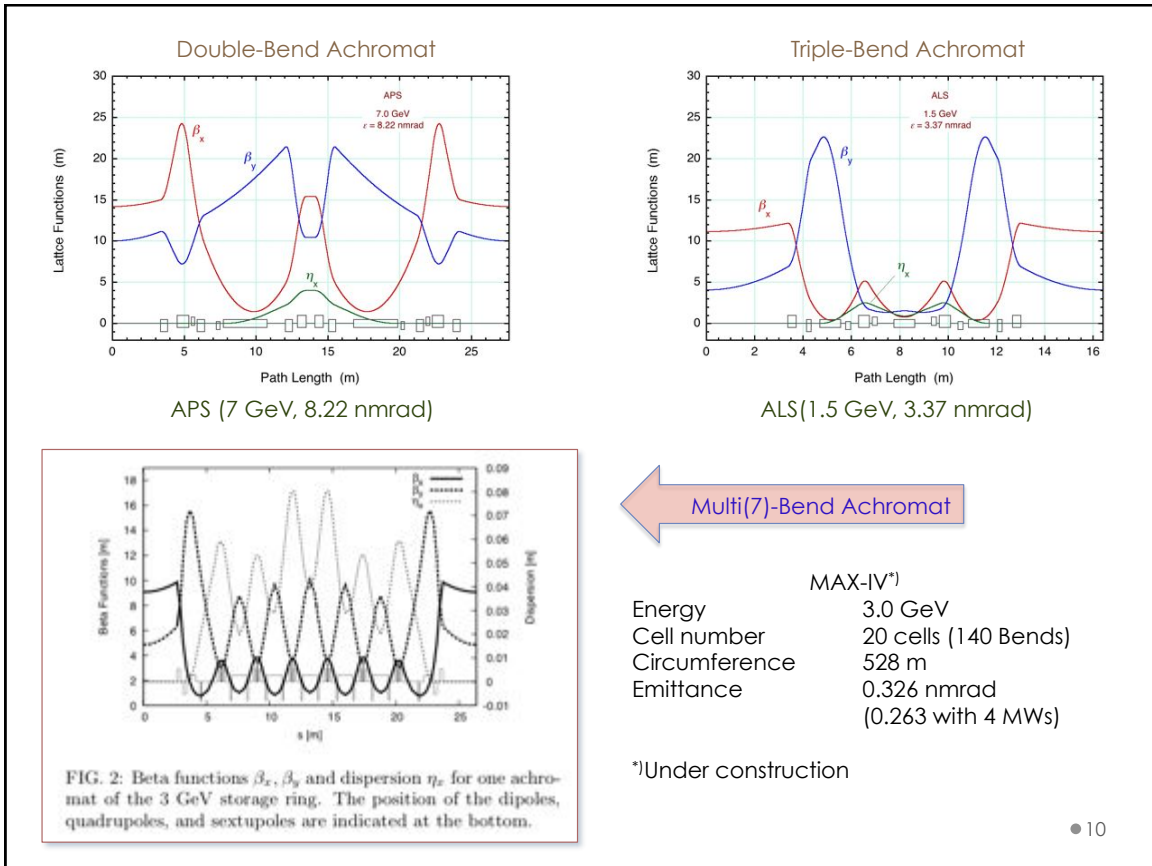
$\Rightarrow$  for 3 GeV ring

- $n_B = 20 \rightarrow \approx 23$  nmrاد
- $n_B = 40 \rightarrow \approx 2.7$  nmrاد
- $n_B = 60 \rightarrow \approx 0.82$  nmrاد

$n_B$ ; number of identical bending magnets

沢山の偏向磁石からリングを構成し、1つの磁石の偏向角度を小さくすればエミッタンスは小さくなる。

👉 **リングは増々巨大になる**



**最近の3GeVエネルギー放射光リング**

Ring	Energy (GeV)	Circumference (m)	Cell number	Beam current (mA)	Emittance (nmrad)	Brilliance @ 2-20 keV	Status
DIAMOND	3	562	24	300	2.74	$10^{20}$	operational
ALBA	3	269	16	400	4.3	$10^{20}$	commissioning
TPS	3	518	24	400	1.6	$10^{20}$	construction
NSLS II	3	792	30	500	0.9	$10^{21}$	construction
MAX-IV	3	528	20	500	0.326	$10^{21}$	construction
東北 (SLIT-J)	3	< 300	$\geq 12$	300 - 400	< 2	$10^{21}$	plan
SPring-8	8	1436	44	100	3.4	$10^{20}$	operational

### 周長300m以下で2nmradの実現は容易ではない！

— 低エミッタンスラティス設計における覚え書き —

- ①直線部は適切な長さにとどめる
- ②10箇所以上の挿入光源用直線部 (→ セル数12以上)
- ③超長直線部を導入しないシンプルなラティス
- ④機能複合型偏向電磁石を用いてコンパクトに低エミッタンス化

(4極磁石ファミリー数をへらす。減衰分配をちょっといじる。)

### 偏向電磁石数とセル数の選択

通常のラティスデザインでは理論最小エミッタンスの2~3倍程度になるので、2 nmradを目指すには少なくとも**50程度**の偏向電磁石でリングを構成しなくてはならない。

→ セル内の**偏向電磁石の間隔 S**を考えてみると、

$$C \approx 2\pi\rho + N\ell_{ss} + N(n-1)S$$

$\rho$ ; bending radius

$N$ ; number of cells

$\ell_{ss}$ ; length of straight section + ~ 3 m

$n$ ; number of bending mags in a cell

$S$ ; length between bending mags

例えば

$$C = 300 \text{ m}$$

$$\rho = 12 \text{ m } (B = 0.83 \text{ T})$$

$$N \times n = 48$$

$$\ell_{ss} = 5 \text{ m}$$

$N$	$n$	$S$ (m)
24	2	1.4
16	3	3.0
12	4	3.6
8	6	4.0

どのようなラティスタイプであっても、1組以上の4極磁石及び2組の6極磁石などを偏向磁石間に入れなくてはならない

→ **周長の制限があまり厳格でないとしても、300m前後のリングで24セルのラティス構成 (DBA) は不可能、16セル (TBA) でも困難**

ビームライン数とのトレードオフよりも、まずは先端的な高輝度光源を目指す



- ・4偏向磁石-12セル
- ・non-achromat (非色消し)ラティス

### 偏向電磁石のパラメータ選択

- ①挿入光源用の直線部数を確保するために、RFステーションをただ一つの直線部におく
- ②ベアラティスでのエネルギー広がり的大小を抑制して、輝度の低下を回避する

☞ **偏向磁石からの放射光パワーを大きくしない**

RFカプラーの能力: 1台の加速空洞に最大で400kW程度を投入できる

挿入光源の放射パワー  $P_{und} [\text{MW}] = 6.336 \times 10^{-6} E^2 [\text{GeV}] B_0^2 [\text{kG}] L_u [\text{m}] I [\text{A}]$

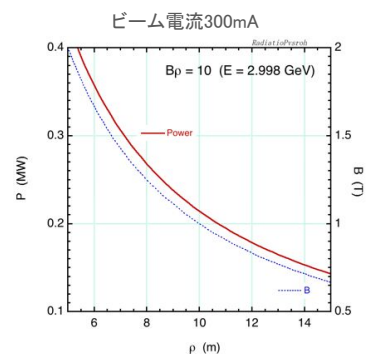
10本の直線部を全てピーク磁場1T、4mのアンジュレータで満たした場合、 $P_{und} = 68 \text{ kW}$

偏向磁石の放射パワー  $P [\text{MW}] = 8.846 \times 10^{-2} \frac{E^4 [\text{GeV}]}{\rho [\text{m}]} I [\text{A}]$

$$\rho \geq 10 \text{ m } (B \leq 1.0 \text{ T})$$



偏向磁石からの放射パワーを200kW程度に抑え、全体の放射光パワーを300kW程度にする。  
ただし周長が長くなるので、偏向曲率半径はあまり大きくないほうが好ましい。

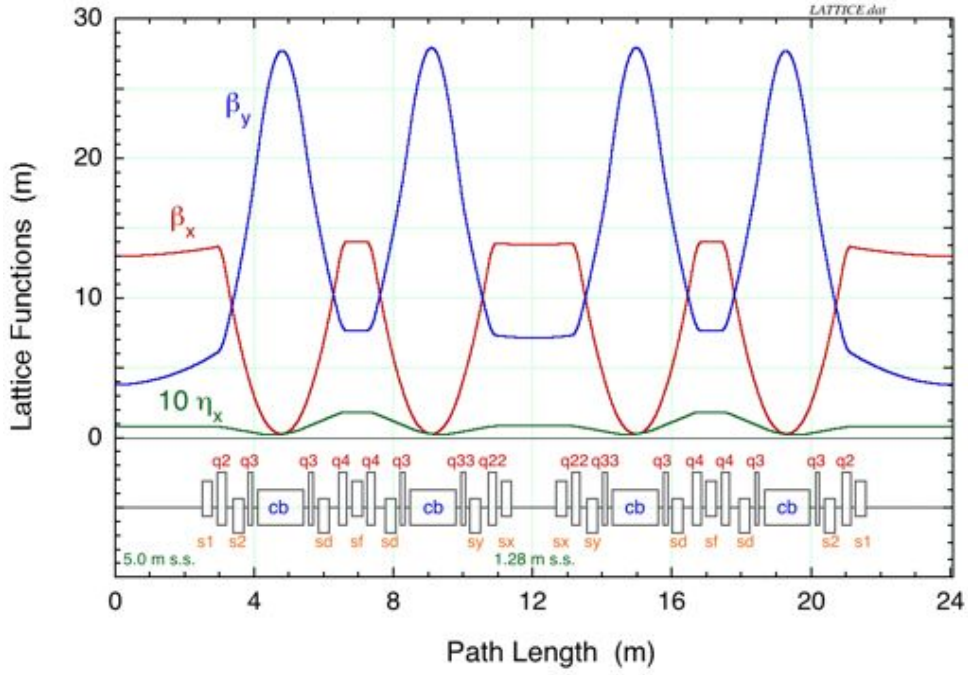


SLiTJ-3GeVリングの主要パラメータ

エネルギー	E	2.998 GeV	2.998 GeV (参考)
ラティス構造	Lattice Type	Modified Quad-Bend (non)Achromat	Modified Quad-Bend (non)Achromat
周長	C	288.912 m	577.824m
セル数	N	12	24
偏向磁石数(偏向磁場)		48 (1.0 T)	96 (0.5 T)
4極磁石ファミリー数(総数)		5 (192)	5 (384)
6極磁石ファミリー数(総数)		6 (168)	6 (336)
長直線部		5.00 m × 12	5.00 m × 24
短直線部		1.28 m × 12	1.28 m × 24
ベータatron振動数	$(\nu_x, \nu_y)$	(22.28, 5.38)	(44.62, 10.72)
自然色収差	$(\xi_x, \xi_y)$	(-58.07, -36.78)	(-119.55, -70.71)
自然水平エミッタンス	$\epsilon_x$	1.80 nrad	<b>0.226 nrad</b>
運動量収縮因子	$\alpha$	0.00069	0.00017
振動減衰時間	$(\tau_x, \tau_y, \tau_e)$	(5.82, 8.06, 4.99) ms	(23.3, 32.2, 19.9) ms
自然エネルギー広がり	$\sigma_E/E$	$9.06 \times 10^{-4}$	$6.40 \times 10^{-4}$
エネルギー損失	$U_0$	0.358 MeV/turn	0.358 MeV/turn
最小・最大水平ベータ関数	$(\beta_x^{min}, \beta_x^{max})$	(0.26, 14.04) m	(0.26, 14.45) m
最小・最大垂直ベータ関数	$(\beta_y^{min}, \beta_y^{max})$	(3.80, 27.90) m	(3.86, 27.71) m
最小・最大水平分散関数	$(\eta_x^{min}, \eta_x^{max})$	(0.02, 0.18) m	(0.009, 0.092) m
直線部のラティス関数	$(\beta_x, \beta_y, \eta_x)$	(13.00, 3.80, 0.076) m	(13.20, 3.86, 0.038) m
減衰分配係数	$(J_x, J_y)$	(1.384, 1.616)	(1.383, 1.617)
6極最適化アルゴリズム		Simple Objective Genetic Algorithm	Simple Objective Genetic Algorithm

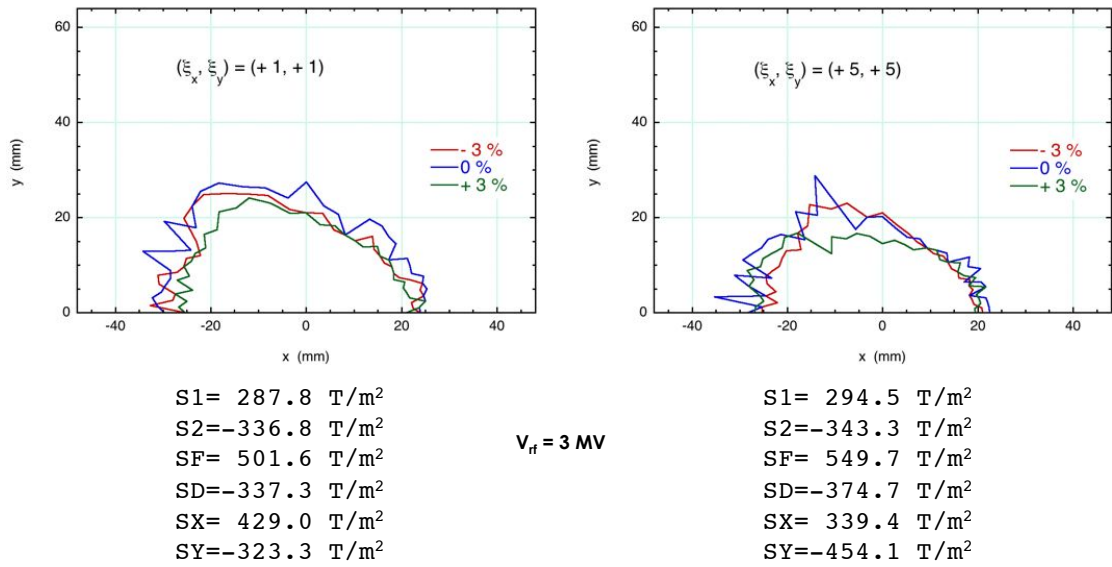
SLiT-Jのリングラティス(v1.1)

C=288.912 m  
 $f_{rf}=506.4$  MHz  
 h = 488  
 $\epsilon = 1.80$  nrad



### SLiT-Jの力学的口径 (v1.1)

Calculated by SAD with SOG Algorithm  
 - Optimized to expand DA in both direction (under developing by T. Muto) -



$S1 = 287.8 \text{ T/m}^2$	$V_{rf} = 3 \text{ MV}$	$S1 = 294.5 \text{ T/m}^2$
$S2 = -336.8 \text{ T/m}^2$		$S2 = -343.3 \text{ T/m}^2$
$SF = 501.6 \text{ T/m}^2$		$SF = 549.7 \text{ T/m}^2$
$SD = -337.3 \text{ T/m}^2$		$SD = -374.7 \text{ T/m}^2$
$SX = 429.0 \text{ T/m}^2$		$SX = 339.4 \text{ T/m}^2$
$SY = -323.3 \text{ T/m}^2$		$SY = -454.1 \text{ T/m}^2$

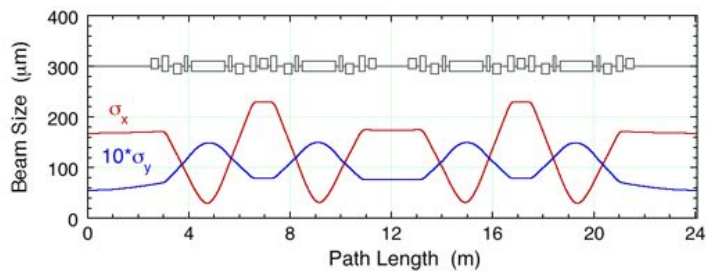
SOGA

弱い6極磁場での最適化が無理なく達成できる



### 挿入光源のコンセプト

セル内でのビームサイズ変化



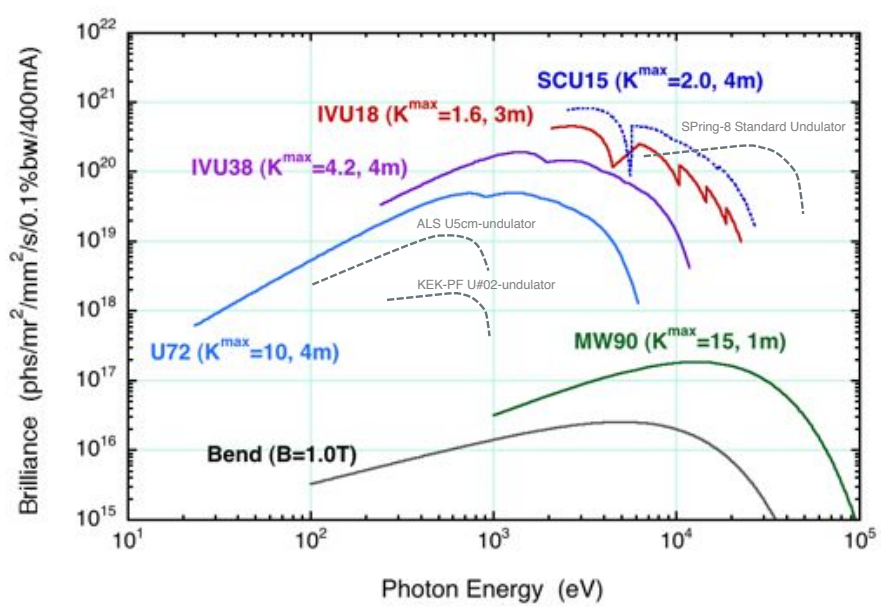
Test Insertions for Evaluation of Light Source Performance  
 (assuming minimum-gap = 5 mm, except SCU15)

	Type	$\lambda_U$ (m)	$K^{max}$	$B_{max}$ (T)	$N_U$	L (m)	$\epsilon_{min}^{1st}$ (keV)	$\epsilon_c$ (keV)	use
SCU15*)	sc	0.015	2.2	1.571	268	4	2.7	9.4	hard x-ray
IVU18	In-vacuum PM	0.018	1.6	0.952	166	3	2.1	5.7	hard x-ray
IVU36	In-vacuum PM	0.036	4.2	1.25	110	4	0.24	7.5	Soft-hard x-ray
U72	PM	0.072	10	1.488	56	4	0.023	8.7	EUV to soft x-ray
MW90	PM	0.09	15.0	1.785	11	1	0.0084	10.7	hard white x-ray
Bend	B	-	-	1	-	-	-	6	-

\*Ideal superconducting undulator

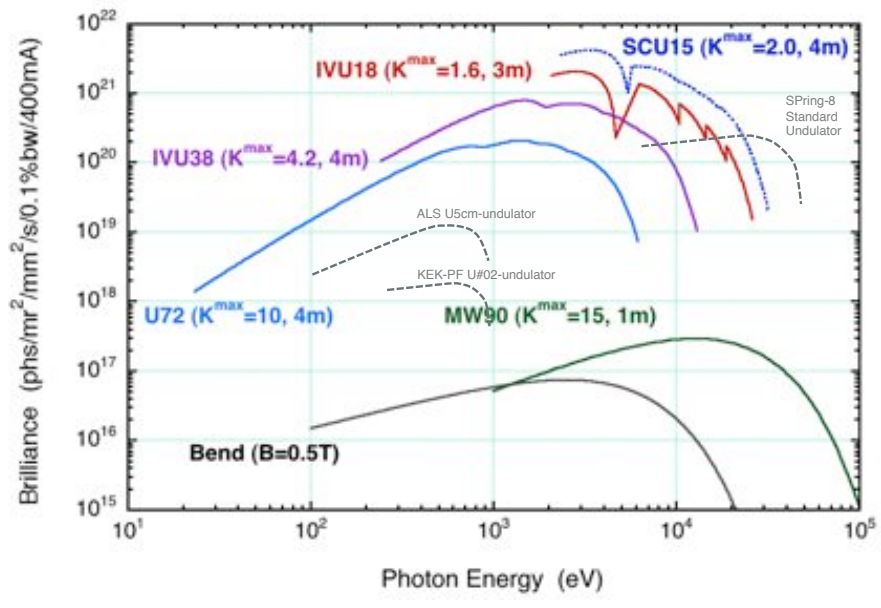


### SLIT-J 放射光輝度



21乗には届かないが世界の最新第3世代リングのレベルと遜色ない

### 580mリングだったら...



リング周長が倍あれば、MAX-IVやNSLS-IIと並んで世界最高輝度レベル

### SLiT-JJリングの入射器

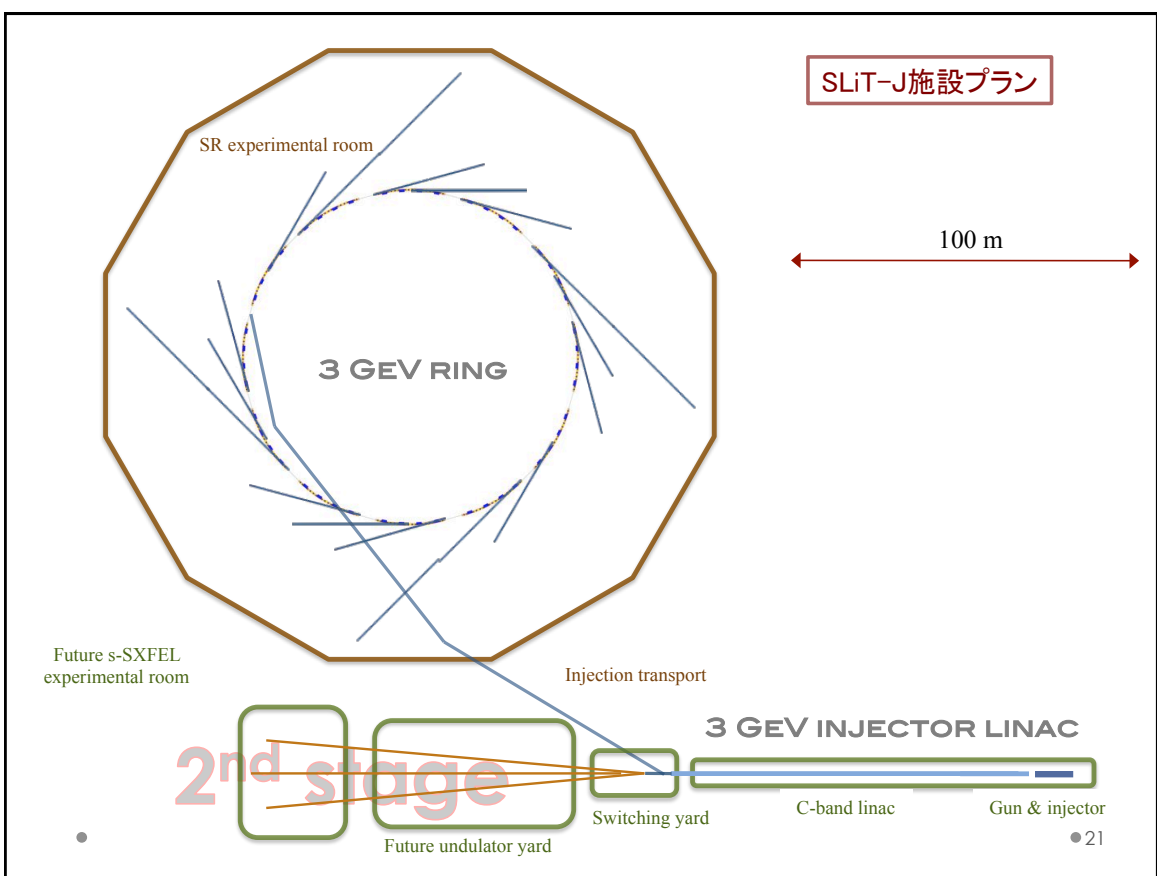
- ・一般にシンクロトロンは入射器以外の役割がなく、将来的な展開機会が乏しい
- ・近年の進化が著しいリナックを入射器として、発展性を内包すべき
  - 軟X線領域でのシングルモードレーザが得られるシード型FEL (s-SXFEL)
 
$$e^{1st}_{\text{photon}} < 3 \text{ keV (0.4 nm)}, P_{\text{peak}} > 1 \text{ GW}$$
- ・SACLAにおける本邦独自のリナック技術を継承する意義は大きい
- ・トップアップ運転に対応する遅い繰り返しであれば、シンクロトロンに比べリナックの消費電力はかなり小さい

### 実現可能なC-バンドリナック入射器のビーム性能

規格化エミッタンス:	1 mm mrad (0.17 nm rad @ 3GeV)	☞ 100 %の入射効率
最大バンチ電荷:	1 nC	
バンチ長:	2 ps	
エネルギー広がり:	0.06%	
最大繰り返し:	50 Hz (1 - 10 Hz @ リング入射)	

- 入射部と加速器中にシケインをあらかじめ設け、s-SXFELに備えるが全長は100m程度で収納可能
- 加速構造はSACLAのチョーク型である必要はなく、従来のS-バンド加速構造と同等
- シンプルな光陰極RF電子銃の導入も

### SLiT-J施設プラン





## SLiT-Jの使用電力評価

アイテム	評価電力 (kW)	注釈
リング高周波加速空洞(ビーム電流300mA)	540	放射光パワー: 偏向部220kW、挿入光源100kW
リング電磁石	300	磁石デザインに依存
リナック高周波(50MWクライストロン38本)	230	10Hz運転
実験ホール・ビームライン	280	ビームライン当たり20kW
空調	200	
冷却水	200	
研究棟・マシンショップ他	100	
合計	1850	2MW以下の達成は可能

太陽パネル発電量: 国内の平均的な気象条件で、100~150 W/m<sup>2</sup>

**2 MW => 20,000~13,000 m<sup>2</sup> (120×120~140×140)**

120~140米四方のパネル面積をもつメガソーラーで電力の地産地消が可能か？  
(参考)東京エレクトロン宮城新工場(黒川郡大和町)では1MWソーラーパネルを設置

●

●22



SLiT OHOKU - J



SLiT OHOKU - J

●

●23

# 東北放射光施設構想白書（概要）

2012年5月7日

東北放射光施設検討会（仮称）有志  
早稲田 嘉夫（世話幹事）他 57名

本白書は、東北放射光施設構想における、東北地方での放射光施設建設の、1）社会的必要性、2）東北復興における位置づけ、3）構想の背景と科学技術の有効性、4）建設・経営・運営形態、5）社会全体への波及効果、の5つの観点について、主要事項を提示するものである。

## 1）社会的必要性

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、東北地方を中心とする東日本における広い地域において、2万人を超える未曾有の犠牲者と約34万人の被災者を出す、神戸大震災を遥かに凌ぐ、我が国最大の災害となった。そして、この震災は、地震予知、津波対策における防災の問題、福島第一原子力発電所の被災による原子力発電に対する安全性対策、それらが引き金となった我が国のエネルギー基盤の脆弱さへの対策、放射能汚染に対する環境対策など、科学技術の課題解決に対する信頼性と責任が問われる契機となった。

一方で、震災により、東北地方における大学等の研究教育施設、科学技術の開発拠点、産業技術開発拠点が罹災し、それらのインフラの復興・整備が、政府や民間の様々なレベルで懸命に進められている。その間、西日本に設置されている様々な研究開発インフラが、東北を含む東日本の復興を支える上で、重要な役割を果たしてきた。その中でも、幅広い学術・産業の利活用が行われている最先端の放射光施設である西日本の SPring-8 などが、東北地方を中心とする磁石材料開発や、グリーン材料開発などの研究開発の延滞を防ぐ役割を果たすことで、東日本の復興のエンジンとしても活用されている。しかしながら、西日本の放射光施設だけでは、もはや、東日本の研究開発の遅延を防ぎ、復興促進の需要を満たし、さらに我が国全体の研究開発の先端性の維持を十分に果たすことに対して、赤信号が点滅しはじめている。この現状を根本的に打破するためにも、東北地方に放射光建設を可及的速やかに建設することが求められている。

## 2）東北復興における位置づけ

東北地方で展開されているものづくりを中心主題とする研究開発には、我が国の科学技術・産業の国際競争力を維持する上で極めて重要な役割を担う内容が多く、東北地方の大学・研究機関の研究者は、その研究分野における国際的リーダーとして数多く活躍しており、復興とイノベーションの両立性の維持が課題として急浮上してきている。加えて、福島第一原子力発電所の被災により、除染など放射線に関わる環境浄化といった解決に緊急性を要する課題が新たに生まれている。これらの課題解決を迅速に、かつ効率的に行うためには、幅広い研究分野を、多様な分析手法を有する実験室（ビームライン）でカバーできる、リング型放射光施設を東日本地域に建設し、地産地消で課題解決を行うことが求められている。このことは、東西の適切なロケーションに基幹となる研究基盤インフラを持つことによって、今回の大震災から学んだ、我が国の戦略的研究基盤に関する被災リスクの分散を、実効的なものにするにもなる。

### 3) 構想の背景と科学技術的有効性

世界中で、2000年代に入り、スイスの SLS、フランスの SOLEIL、英国の DIAMOND、オーストラリアの AS (VICTORIA と呼ばれている)、中国上海の SSRF、スペインの ALBA など、「中規模の高輝度光源」とくにリング型光源の建設が積極的に行われ、すでに供用が始まっている。さらに、台湾の TPS、米国の NSLS-II、スウェーデンの MAX-IV などの高性能の中型リング型放射光源が次々と計画され、建設が開始されている。この国際的な状況は、放射光が供する高輝度ナノビームの実現などによって、学術的利用のみでなく、バイオ、材料、エレクトロニクス、エネルギー、安全安心などの広範な領域における産業技術分野のイノベーションを実現するために不可欠な最先端の解析ツールとして、その重要性・必要性が共通認識されているからである。すなわち、放射光が学術・産業界における研究開発ツールとして、多様な研究領域をカバーする「共通の研究基盤」との位置づけが定まったことを明確に反映している。我が国では、昨年度のスプリングエイト (SPring-8) での SACLA の成功により、X 線自由電子レーザー (XFEL) の利用が始まったが、これは「線形型光源」であり、選り抜かれた最先端の光科学研究の先導的利用に附するものである。

一方、本構想の「リング型光源」は、多様な研究領域の基盤的な利用ニーズに一度に機会を供給し、研究開発のソリューションを与えることができる。この“利活用の多様性と同時性”が、今、東北の復興と日本全体のイノベーションの加速に求められている。我が国の「リング型光源」の現状は、2014 年の台湾新光源 TPS の完成により、SPring-8 ですら、アジア最高輝度の地位を追われることになる。中期的には SPring-8 のアップグレードや PF の ERL 計画により、一部回復の可能性はあるが、すくなくとも 5~10 年は世界の後塵を拝することとなる可能性が高く、国際競争の観点からも、本構想を可及的速やかに推進すべき状況にあることは間違いない。

科学技術的観点から本構想の基本計画を概観すると、本構想は、SPring-8/SACLA で開発した、C バンド加速器、真空封止アンジュレータ等の独自の最新技術を活用することにより、何年もかけて計画された海外の中型リング光源の光源性能に、約 2 年の建設期間で追いつくものである。科学技術的有効性の高さは、加速器科学、X 線光学、利用研究分野全般に於いて SPring-8 ならびに SACLA での成功事例により、十分実証済みである。

我が国では、「中規模の高輝度光源の建設」が長年にわたり行われなかったため、その領域のサイエンス及びそれを活用するテクノロジーの進捗に遅れをとりかねない状況になっている。本構想はそのような我が国の状況をも、一挙に打開するものである。

### 4) 建設・経営・運営形態

本構想では、200 億円という建設コストが見込まれている。これは、20~30 本のビームラインすなわち、20 以上の研究開発領域をカバーできることを意味し、非常に効率的な投資であると認められる。見込まれる年間利用者は、年 5000 時間運転として、延べ 2000~3000 の研究グループの利活用が可能となり、東北地方だけではなく、我が国全体の研究開発、とくに産業技術分野のイノベーションの実現に幅広く貢献することが期待できる。建設の実働部隊は、東北地方の人材活用はもちろんであるが、オールジャパンで結成されるべきだと考える。

本構想では、徹底した省エネルギー設計を進めることにより、オペレーションコストが少ない施設を建設する。それでも保守・高度化で年間 10~15 億程度の運営費が必要になると考え

られる。建設後の運営費には様々な考え方があろうが、ベース部分は確保されることが必要最低条件であり、本構想が我が国の科学技術分野を根幹で支えるものであることを考慮すれば、建設開始時にそれは担保されるものと考えている。

運営の形態については、既存の供用促進法に基づく運営の他に、様々な可能性が考えられる。例えば、出資責任や得られる成果・知財が法的契約により規定される産官学による技術研究組合による運営形態も1つの考え方であろう。特に官については文科省と経産省の双方が経営に関与し、NEDO、JST などを通じて産業界と学术界の連携を強力にサポートする仕組みを構築することが望ましい。すなわち、資産と運営費は国が有し、運営と利活用には利用者が大きく関与する枠組みによって、最先端の学術情報に基づく産業利活用を具体的な成果にまで繋ぐ運営形態とする。この運営形態は、産業技術分野のイノベーションを実効的に推進していく上で有効と考えられ、かつPF、SPRING-8のアカデミア側の視点による運営とは異なる新たな形で、産業連携もしくは産学連携側に重点を置くことが可能となる。また、産業界が放射光と言う最先端の道具を、自らが抱える種々の課題解決に容易かつ積極的に活用できる仕組みづくりのために、例えば、まずは東北地区にある7つの国立大学、公設研究所・センター等の研究者が、放射光利用に関する自らの得意分野を登録・連携して支援する「放射光利用バンク（仮称）」の整備、ならびに放射光利用に関するナノアプリケーションのルーチン化等を建設当初から積極的に導入することによって、放射光の産業応用への展開を容易にすることを、構想に含めることとする。

いずれにせよ、これまでの放射光施設運営のノウハウを活用して、ユーザーフレンドリーで、より社会に対してアカウンタブルな特徴ある施設とすることが肝要である。

## 5) 社会全体への波及効果

本構想は、東北地方にある7つの国立大学の教員・公設機関の教員・研究者の組織的支援と連携により、放射光の基礎科学的利用はもちろんであるが、放射光の特徴である「高輝度ナノビーム」あるいは「短パルス性」などを活用した産業応用の促進を積極的に図ることで、広範なイノベーション推進研究を強力に支援することを掲げている。すなわち、我が国の新たな産官学連携をめざす「東北S T I R拠点」の実現である。その拠点において成し遂げられる「科学技術・産業の基盤技術の革新的振興」によって、東北から我が国全体の「ものづくりの優位性維持と発展」を図る。結果的に、3・11で被災した東北の復興・発展の実現をも図る、短期即戦力実効型の構想という特徴もある。

本構想は、今後の国際的なエネルギー資源状況変化の中でも、持続的に高い生産性を保持可能な「新時代中型高輝度放射光施設」であり、徹底的な省エネルギー技術の導入ならびに施設に必要な電力の地産地消などの追求によって、環境・エネルギーの視点からも、研究成果と使用エネルギーとのバランスを満たす、我が国ならびに世界的にも今後求められるS T I R拠点のモデルケースになり得る。

(注：S T I R：Science, Technology, Innovation and Reconstruction)

本構想の実現に伴う波及効果は、当然、東北地方に限定されるものではない。本構想の基本的理念である「基礎科学の成果に立脚した科学技術・産業技術の革新的振興」によって、ものづくりの優位性維持と発展をはかることは、例えば、我が国全体のものづくりを、韓国、台湾、中国などの技術的追随を許さない最先端レベルに浮上させることに繋がる。しかも、この波及効果は、物質・材料に

限るものではなく、生命・バイオ、エレクトロニクス、エネルギーなど、広範な分野における新たなイノベーションを生み出す可能性を十分有している。言い換えると、本構想で整備するリング型高輝度光源は、多様な課題に対する利用ニーズに、一度に多数の機会提供を実現し、研究開発にソリューションを与える「利活用の多様性と同時性」を兼ね備えている点でも、社会全体への波及効果が十分期待できる。

最後に、本構想を実現するサイトについて述べる。東北放射光施設を建設するサイトは、我が国が創り出した放射光活用の世界の時流であるナノアプリケーションが確実に担保されるため、堅牢な地盤が必要である。東日本地域では、今回の震災によって、堅牢であった地盤とそうでない地盤があぶり出された事実もある。それらの情報を活用するとともに、パワーサプライ、交通アクセス等の良さととのバランスを考えたサイトの最終決定が望まれる。現在の新幹線、高速道路などの交通網の充実、産業界のリスク低減のための生産拠点の分散状況とも合わせると、東北地方は、まちがいなく本構想の適格地域であると結論できる。

なお、本白書（概要）の作成に際して、大所高所の議論・コメントを頂戴した方々は、以下のとおりである。

江刺正喜（東北大学教授・原子分子材料科学研究機構）

岸 輝雄（物質材料研究機構・顧問）

北澤宏一（科学技術振興機構・顧問）

木村茂行（未踏科学技術協会・理事長）

熊野勝文（東北大客員教授・マイクロシステム融合研究開発センター・元リコー）

高尾正敏（大阪大学特任教授・元パナソニック）

高原 淳（九州大学教授・先導物質化学研究所、カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所）

久道 茂（宮城県対がん協会会長・元東北大学医学系研究科）

細野秀雄（東京工業大学教授・応用セラミックス研究所）

増本 健（電磁材料研究所・理事長）

[氏名 五十音順]

吉村 昇（秋田大学学長）

藤井克己（岩手大学学長）

里見 進（東北大学総長）

佐藤 敬（弘前大学学長）

入戸野 修（福島大学学長）

見上一幸（宮城教育大学学長）

結城 章夫（山形大学学長）

[大学名 五十音順]