

東北放射光施設(SLiT-J)構想

Synchrotron Light in Tohoku, Japan

～東北の未来を加速する放射光施設～
東北の未来を拓き、我が国のものづくり新産業を創出

平成26年7月10日

東北放射光施設支援協議会 事務局世話幹事

早稲田 嘉夫

東北大学 多元物質科学研究所

電子光理学研究センター

Phone: 022-217-5166

E-mail: waseda@tagen.tohoku.ac.jp 1

東北放射光施設 (SLiT-J)

(省エネ・イノベーション支援型中型高輝度放射光施設)

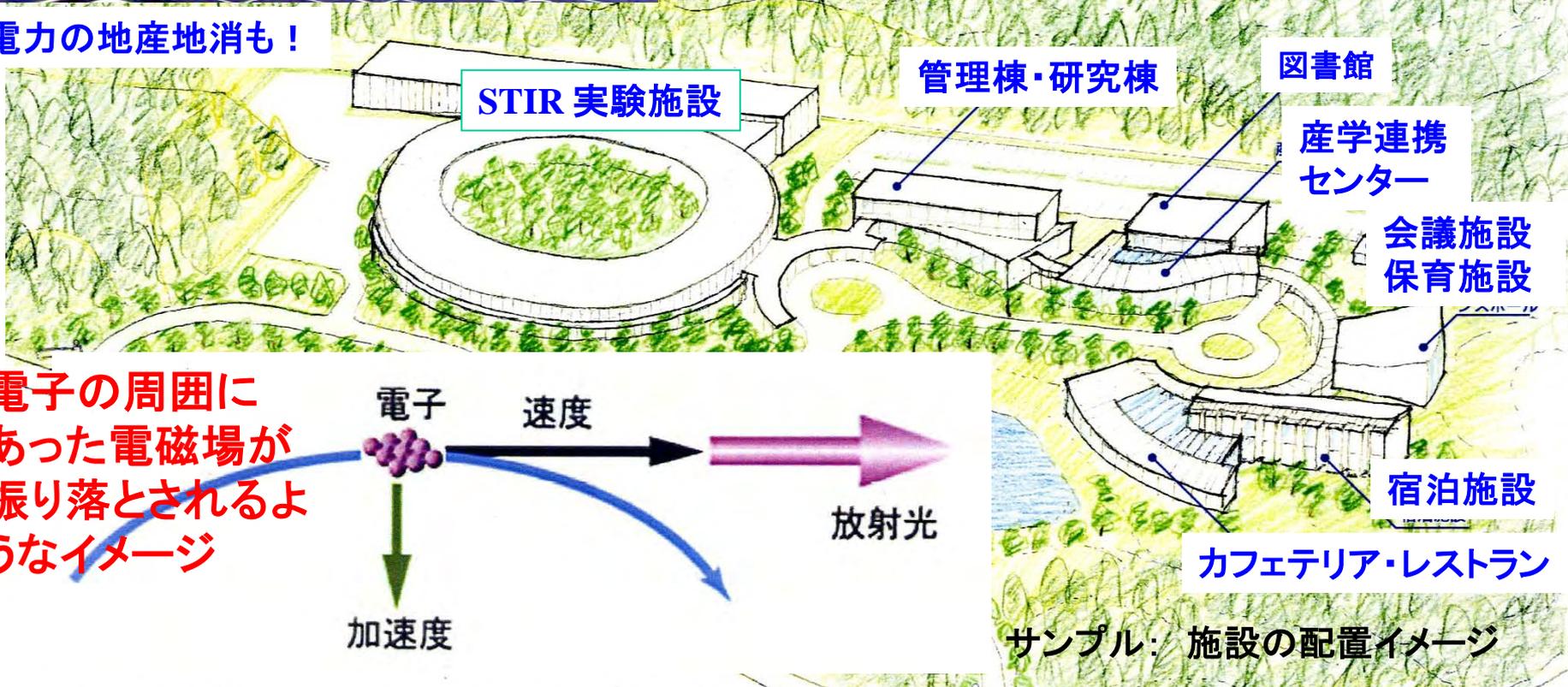
SLiT-J: Synchrotron Light in Tohoku, Japan

東北地区にある七つの国立大学の共同提案として推進

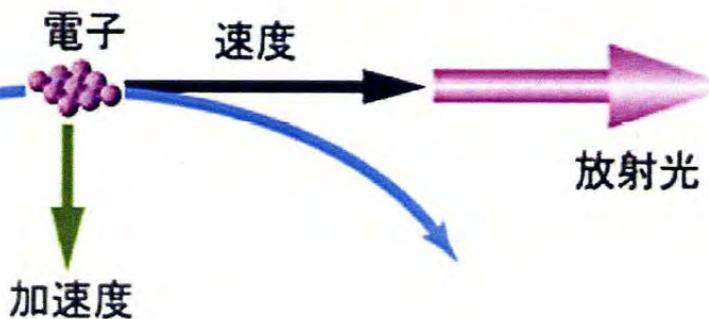
今日の東北の課題解決は
明日の日本の課題解決



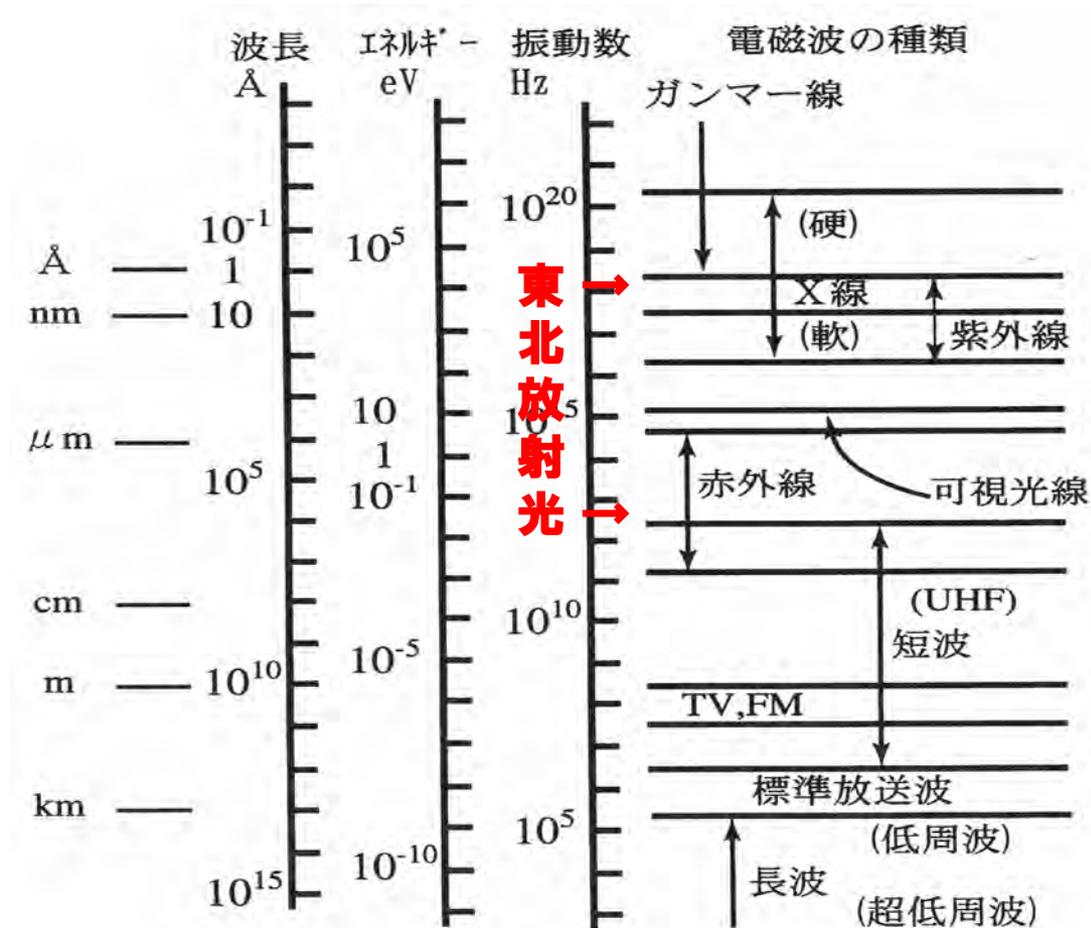
電力の地産地消も！



電子の周囲に
あった電磁場が
振り落とされるよ
うなイメージ

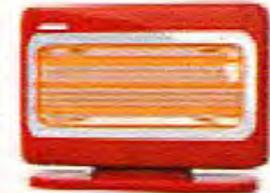


放射光施設は「光」の発生装置で、 放射能ではない



医療検査

加熱 (通信)



情報通信
(治療)

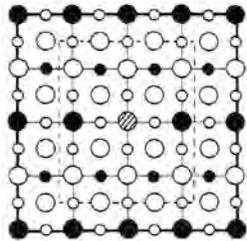
放射光施設で発生するエックス線は、人体への影響が比較的小さく、医療診断等で頻繁に利用されているものと同じ。管理も同程度³でよい

放射光施設とは？ **光の工場** **フォトン ファクトリー**

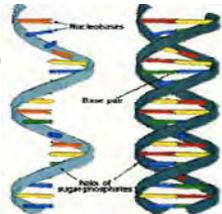
一口で言えば： 強力な光を使った巨大な顕微鏡

- ・極微量でも、元素の種類や原子の配列がわかる。
- ・刻々と変化する物質や構造情報を、原子・分子レベルで捉えることができる。**ナノメートル=100万分の1ミリメートル**

原子配列



遺伝子



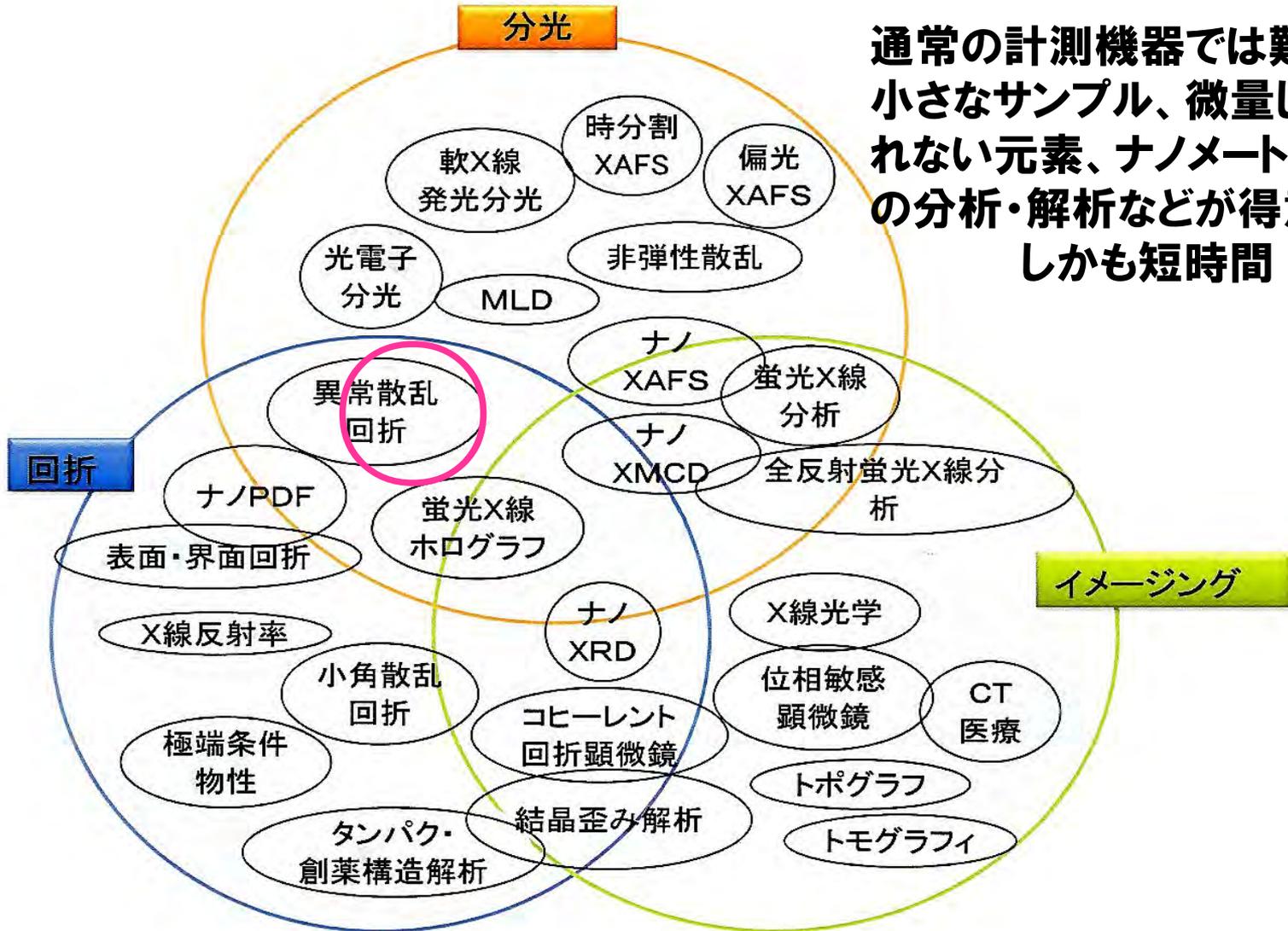
既設の放射光設備(兵庫県のSPring-8)

放射光施設は、発生するエックス線などを遮蔽して安全を確保。また、電源が切れると、電気が止まる ⇒ 放射光は発生しない

放射光施設は、電子レンジやテレビと同じ

放射光の用途は、多種多用

放射光は、材料科学、分析化学、宇宙・地球科学、医学・生命科学、環境科学などの、基礎研究から応用研究、さらに、産業利用に役立っている



通常の計測機器では難しい、
小さなサンプル、微量しか含ま
れない元素、ナノメートル領域
の分析・解析などが得意、
しかも短時間

原子の大きさは、約0.1～0.3nmナノメートル

$$1 \text{ nm(ナノメートル)} = 10^{-9} \text{ m}$$

$$1 \text{ }\mu\text{m(マイクロメートル)} = 10^{-6} \text{ m}$$

$$1 \text{ mm(ミリメートル)} = 10^{-3} \text{ m}$$

10億分の1メートル 0.0000000001 m

(100万分の1ミリメートル)

どんな大きさか ？

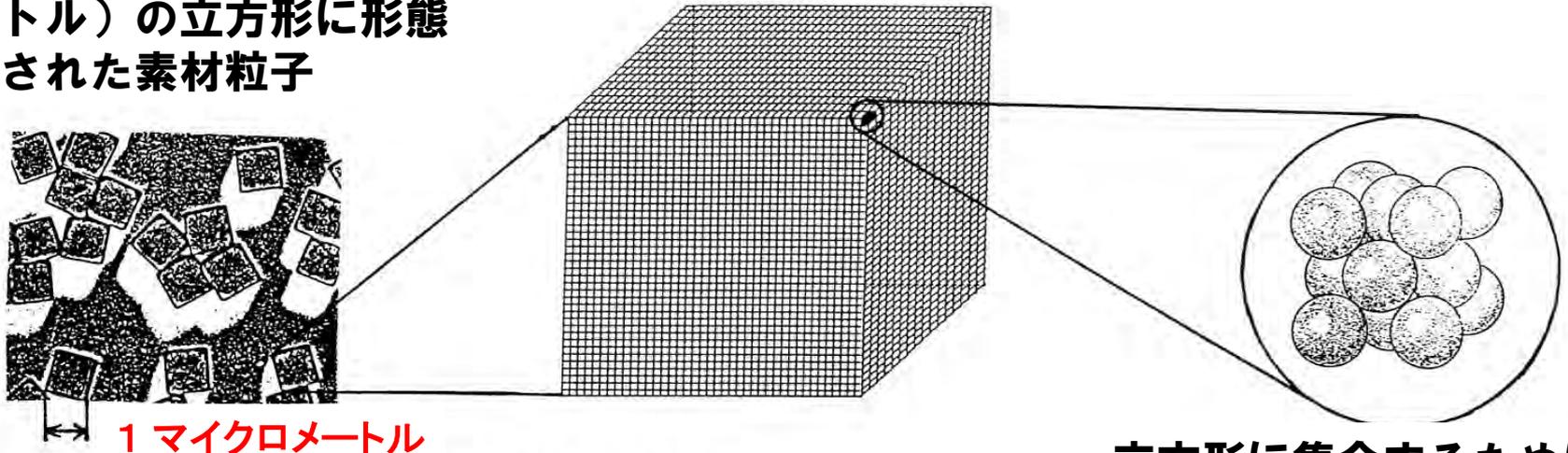
例えば、九州ー北海道の距離(2000 km)を

10億分の1にすると約2mmになる。

[参考:原子核はさらに10万分の1の大きさ]

新素材・新材料は、原子（ナノ）レベルの配列を制御して創る

一辺の長さが1マイクロメートル（1000分の1ミリメートル）の立方体に形態制御された素材粒子



1個の粒子は直径1ナノメートル（100万分の1ミリ）程度の大きさの原子が10億個程度集合した状態である

立方体に集合するためには、最小単位が立方体に制御されていることが基本である

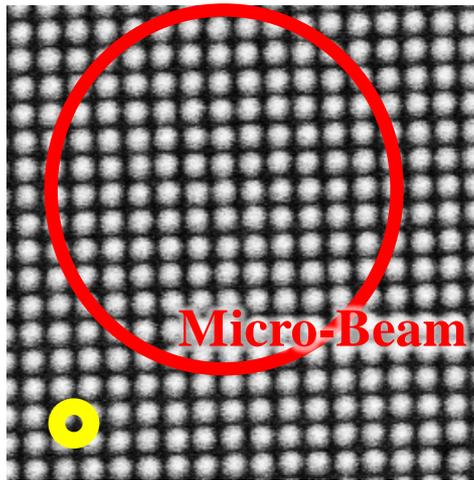
原子（ナノ）レベルの課題には、強力な光を使った高性能の顕微鏡に相当する放射射光施設が活躍する領域

単一ドットからの磁化反転の測定



マイクロビーム → 100ドットの平均情報
ナノビーム → 単一ドット(φ200 nm)からの情報

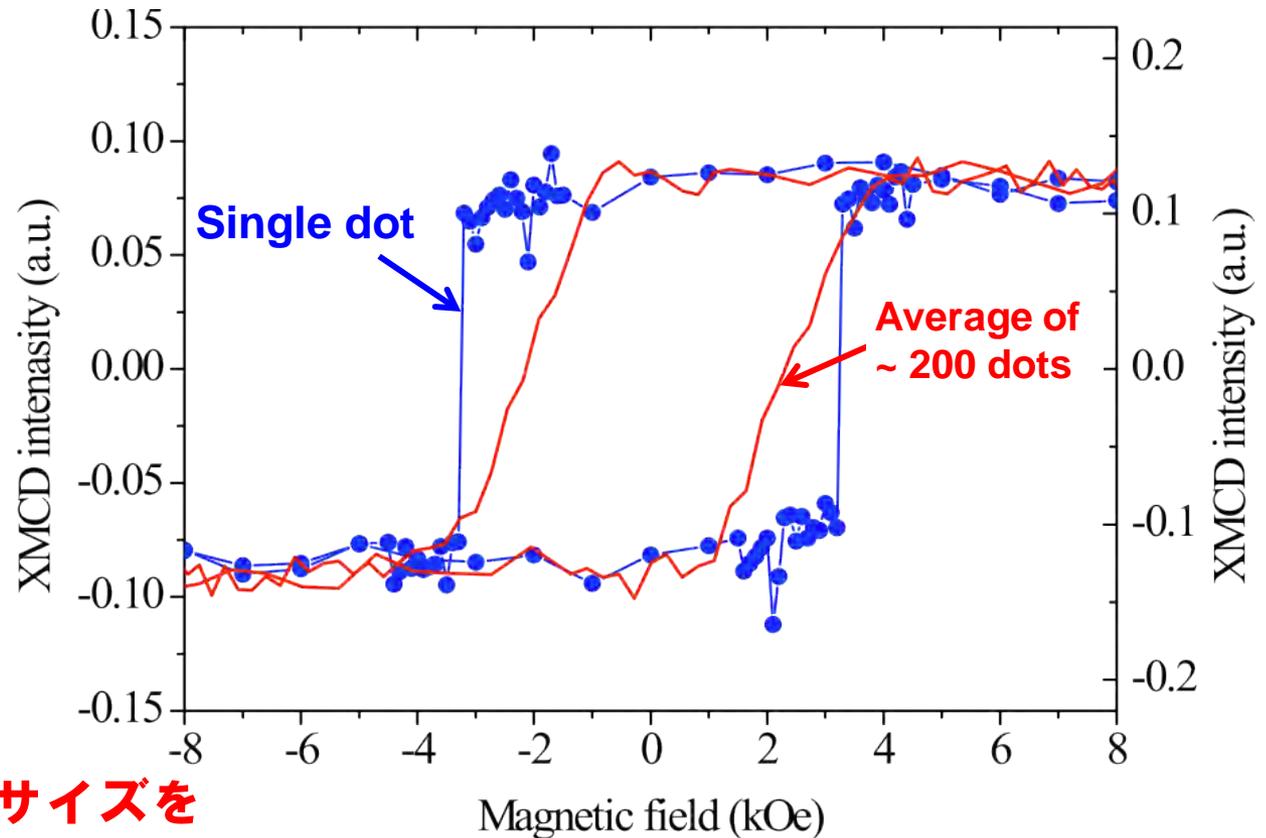
Co₈₀Pt₂₀ magnetic dots



100nm ナノビーム

放射光を使えば、光のサイズを
100ナノメートル程度に絞って
も測定が十分できる

[ナノアプリケーション]



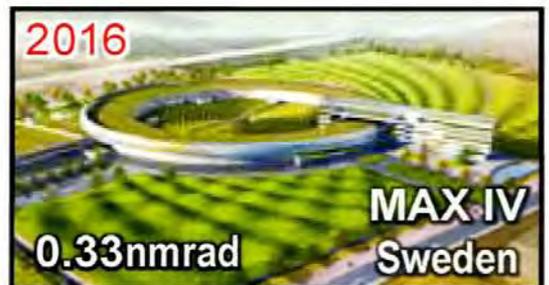
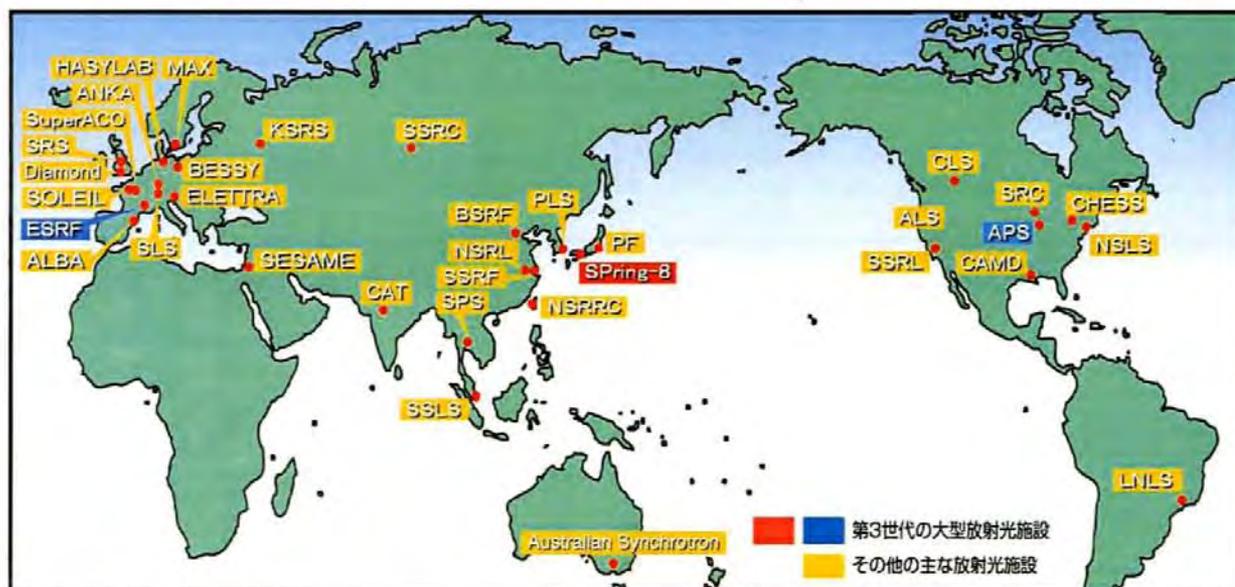
近藤祐治 (秋田県産業技術センター)

我が国では、なぜか関東地区の南・西に、放射光リングが建設されている。また、エネルギーの低い X線領域（1～10 keV、とくに5keV以下）の光源は、完全に欠如！

元素戦略、とくに炭素や酸素等の軽元素に基づくイノベーション推進研究には、X線領域（1～10 keV）の中型高輝度のリング型放射光施設が必要不可欠！

なお、放射光施設がイノベーション推進研究に極めて有効なことは、世界で認知済みである

放射光のナノアプリケーションの国際競争が始まる 中型リング光源の建設ラッシュ



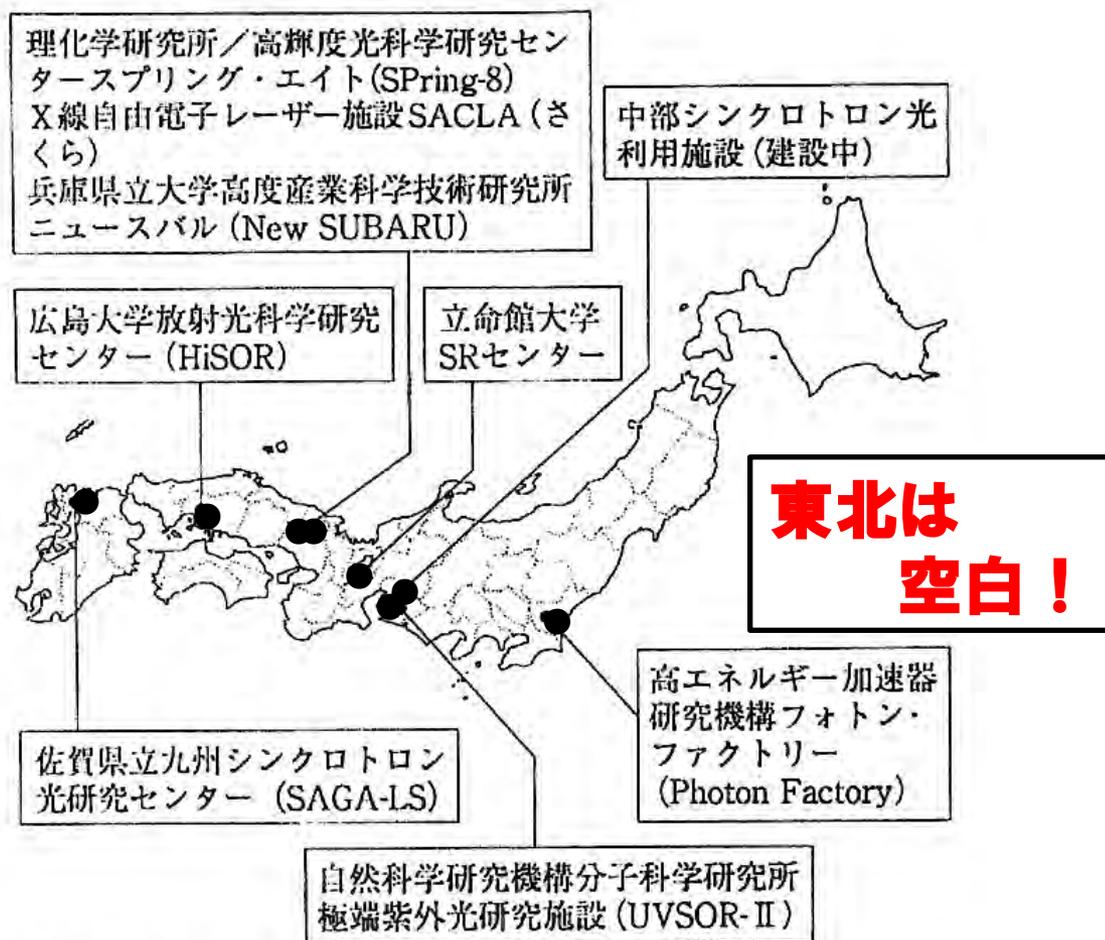


図1-20 国内の放射光施設

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 講談社 2011年9月より

既存放射光施設が抱える問題点

ハード面での問題点

- ・ 日本には**高輝度軟X線光源が不在**

軟X線ナノアプリケーション利用環境の整備が大幅に遅れている。

中型高輝度光源(STIR施設)は必須！

- ・ **軟X線ナノアプリケーションのための汎用ビームラインが不在**

専門知識を要する超高真空機器取扱いや解析が必要で利用には高い敷居が存在する。

先端計測基盤(SPring-8)のノウハウを生かした汎用計測基盤の整備が必須！

ソフト面での問題点

- ・ **産業分野の急増する軟X線アプリケーションの需要に未対応**

慢性的なビームタイム不足により、利用機会が制限されている。

**基礎科学的研究施設のパラサイトの利用から、
産業イノベーションの創出をミッションとした専用施設が必須！**

- ・ **産業界の材料開発のペースと不整合**

課題募集間隔が広く、PDCAサイクルの遅延につながっている。

産業界の開発ペースに合わせた利用機会の提供が必須！

21世紀を拓くキーテクノロジー(軽元素戦略)例:

炭素を大量消費・排出する時代から、炭素を材料として利用する時代への大きなパラダイムシフト

ダイヤモンド



地上で最高硬度
高熱伝導度

グラファイト



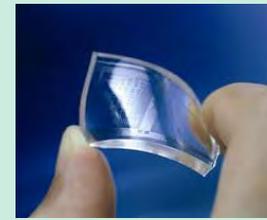
高耐熱(3000°C)
高熱伝導度

炭素繊維



軽量・高強度

グラフェン



最高の移動度

ナノチューブ



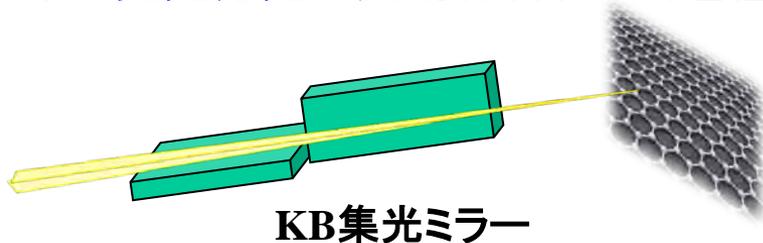
高電流密度
高引っ張り強度

この目的には軟X線ナノアプリケーションが不可欠

偏光制御ナノ吸収分光: 配向構造評価

ナノ光電子分光: 炭素-炭素結合状態評価

In-situナノ発光分光: 実用材料、合成過程評価



KB集光ミラー

炭素材料がもたらすイノベーション例

電子デバイス

高速・大容量通信技術

構造材料

軽量・高強度を兼備した省エネ材料

高強度・低摩擦特性を持つ低損失材料

熱伝達材料

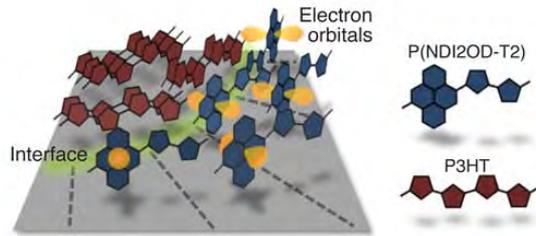
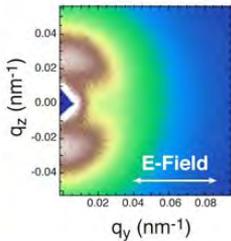
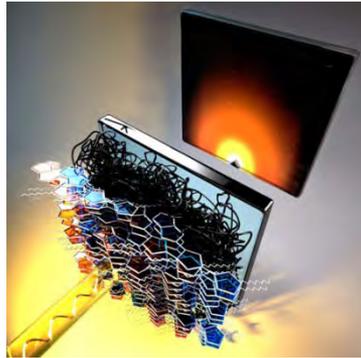
精密な温度・熱制御による省エネ材料

軟X線ナノアプリケーションによる電子状態・機能解析によって
新たなナノ炭素材料の精密合成条件と新規機能を探索・確立

高輝度軟X線が実現する材料科学

軟X線散乱で初めてわかる 有機LEDのマイクロ組織

織



<http://www-als.lbl.gov/>

有機LEDの特性



ポリマーチェーンのマイクロ組織

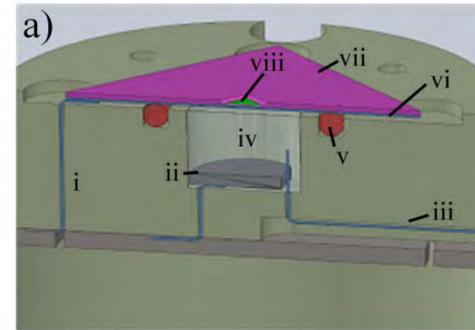


硬X線では解析不能

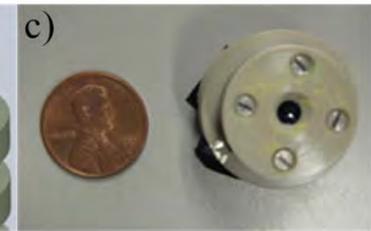
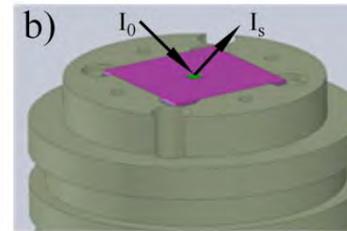
軽元素選択する共鳴偏光軟X線散乱

海外のビームラインでは実用化

Liを超えるMgイオンバッテリーの開発



- i - Pt wire, WE
- ii - Mg foil, CE
- iii - Pt wire, RE
- iv - Electrolyte
- v - Teflon O-ring
- vi - Pt layer
- vii - Si
- viii - Si₃N₄ window



<http://www-als.lbl.gov/>

時分割NEXAFSによるMg電極反応解析



Mgバッテリー開発の課題克服

トヨタ出資によりALS(アメリカ)
専用ビームライン開発が着手

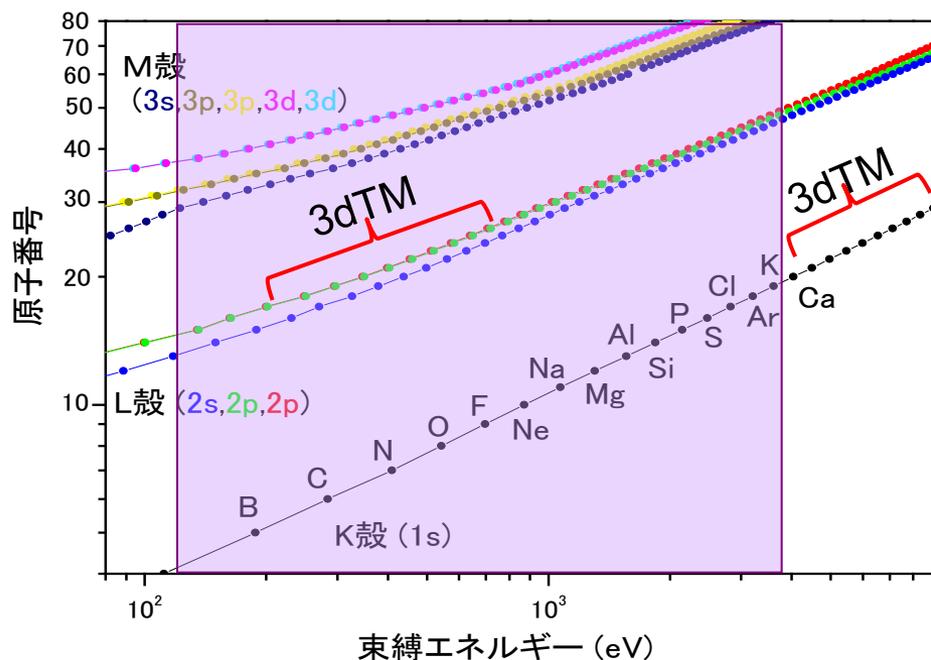
海外への研究拠点移転が進行中

軟X線ナノアプリケーションが先導する軽元素材料開発

軽元素戦略 軽元素素材の構造や組織を制御することで、希少元素を用いることなく特異な機能を発現

軽元素：B, C, N, O, Mg, Al, Si, P, S, など

- 地球上での存在度が高く、安定した資源供給が可能
- 原子量が小さく、材料の軽量化による省エネルギー化が可能
- 構造・組成の制御により、新しい高機能性材料を創成



軽元素の吸収端は軟X線領域に存在

↓
軟X線ナノ分光アプリケーションにより、
軽元素材料の電子状態・組成・構造と
機能の関係を解明

軟X線ナノ分析による、軽元素戦略を基軸とした材料イノベーション

東北放射光施設の特徴とターゲット

- ・光源性能は、既存の最先端施設(例えばSPring-8,PF)の水準を確保しつつ、建設コストは約5分の1、建設期間も約3年以内の**新時代中型高輝度放射光施設** **約300億円 3GeVクラスの省エネルギー型**
- ・しかも、水平エミッタンスは、**アジアでトップの高性能**
- ・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を実現**
- ・東北地方およびその周辺地域での**科学技術・産業技術の革新的振興**によって、**東日本大震災からの復興**ならびに**我が国全体の物づくりの優位性維持と発展に利活用**



東日本大震災復興のシンボルの一つに

東北放射光施設：低コスト、省エネ型イノベーション利活用施設

炭素や酸素等の軽元素に関するイノベーション推進研究に最適な、軟X線領域(1~10 keV)で、世界の最先端を走る高輝度放射光源を**実現!**

SPring-8が不得手とする軟X線領域において世界最高性能

エネルギーの地産地消

メガソーラーにより約4MWを発電
(SPring-8は全ての電力を外部から受電)

省エネルギー設計

消費電力 約3.7MW

SPring-8(約30MW)の約1/10

コンパクト設計

周長340mのコンパクト設計

SPring-8の周長は1436m

世界最高級の性能

水平エミッタンス 1.1nmrad
SPring-8(3.4nmrad)の約1/3

コンパクト加速空洞^{ワーム}を
直線部一つで全放射光パワーを供給

高輝度 軟X線

$>10^{21}$ Phs/s/mrad²/mm²/0.1%b.w.@1keV
($>10^{18}$ Phs/s/mrad²/mm²/0.1%b.w.@1keV)
SPring-8の約1000倍の軟X線輝度

シード型軟X線FELオプション
SASEからシード型FELへ
完全コヒーレンスX線の利用へ

東北放射光施設とSPring-8は、相補的に波長域・利用者層・利用形態をカバー

(青字はSPring-8のスペック)

平成26年3月12日に公表

約200件の提案の中から重点計画27件を選択して 提言 「中型高輝度放射光源」も27件に含まれた

提言

域番号 26-1

第22期学術の大型研究計画に関する マスタープラン (マスタープラン 2014)



平成26年(2014年)2月28日

日本学術会議

科学者委員会

学術の大型研究計画検討分科会

新しい時代の科学技術立国を支える放射光科学の高輝度光源計画

生命科学、工学から文化財研究に至る広範な学術分野で常に研究の次世代を切り開いてきたツールである。実績のある高エネルギー加速器研究機構(KEK)・フォトンファクトリー(PF)や15年前に共用を開始し、4,000人にのぼる産学官の利用者がコミュニティを形成し先端的研究を行っている。これまでの放射光先導製造やダイナミクスに関する学術研究領域が切り開かれ、物質や生命に対する理解を深めると共に、応用された。

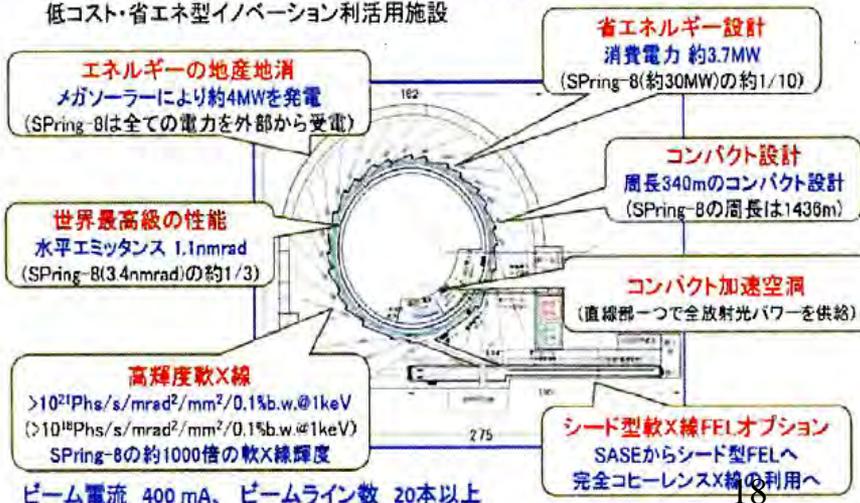
生命科学の更なる発展
放射光施設の早急な
構築するものである。
放射光施設は、原子・分
子可視化することで、
時間発展の理解を
将来的な回折限界光源
施設のイメージング技
術高輝度放射光施設を
・生命科学を創造す
これにより将来、
分野で世界をリードす

学術研究を目指しな
省エネルギー運
転り入れたものである。

また、ユーザー施設としての要件を満たすために、1)先端研究に必須の高輝度放

中型高輝度放射光源の設計コンセプト

我が国で開発された世界最先端の加速器技術を駆使し、SPring-8あるいはKEK-PFが不得手あるいはカバーしきれない軟X線領域において、世界最高性能かつ低コスト・省エネ型イノベーション利活用施設



この新型放射光施設は、既存の放射光施設とは相補的に、波長域・利用者層・利用形態をカバーする

(参考: (1)はSPring-8のスペック)

東北放射光 (SLiT-J) : 高輝度軟エックス線のための最先端施設

主たるターゲット:

(炭素)カーボン、窒素、酸素、アルミニウム、シリコンなどの 軽元素を含む物質

主たる測定法:

軟エックス線高輝度光による光電子・吸収・発行分光、磁気円二色性、PEEMなど

研究テーマ例:

新機能炭素材料・デバイスの開発

レアメタルフリーの酸素・窒素を含む強磁性材料の開発

細胞内部の三次元的かつ経時的変化の直接観察

たばく質の酵素反応解析(元素の離脱、水の分解、窒素の固定化等を含む)

光電子顕微鏡 (PEEM) を用いた酸素・窒素を含む材料の磁区構造解析

Liイオン電池用正極材料の開発

高分子(ゴム)中のS原子の精密解析

レアアースフリー酸窒化物蛍光体の開発

SiO₂/SiC界面分析によるパワーデバイスの開発

酸素等を含む高温超伝導体の発現機構の解明

環境物質中に含まれる微量元素の評価

軽元素の高分解能原子分子分光

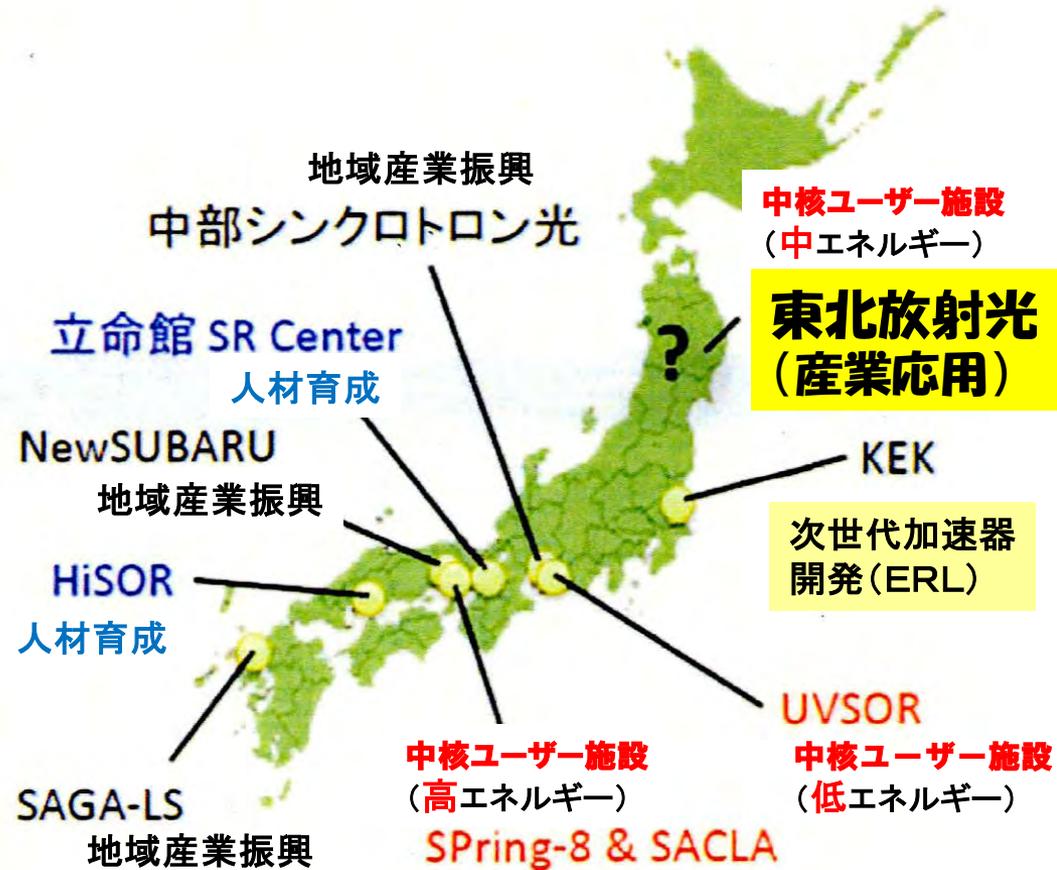
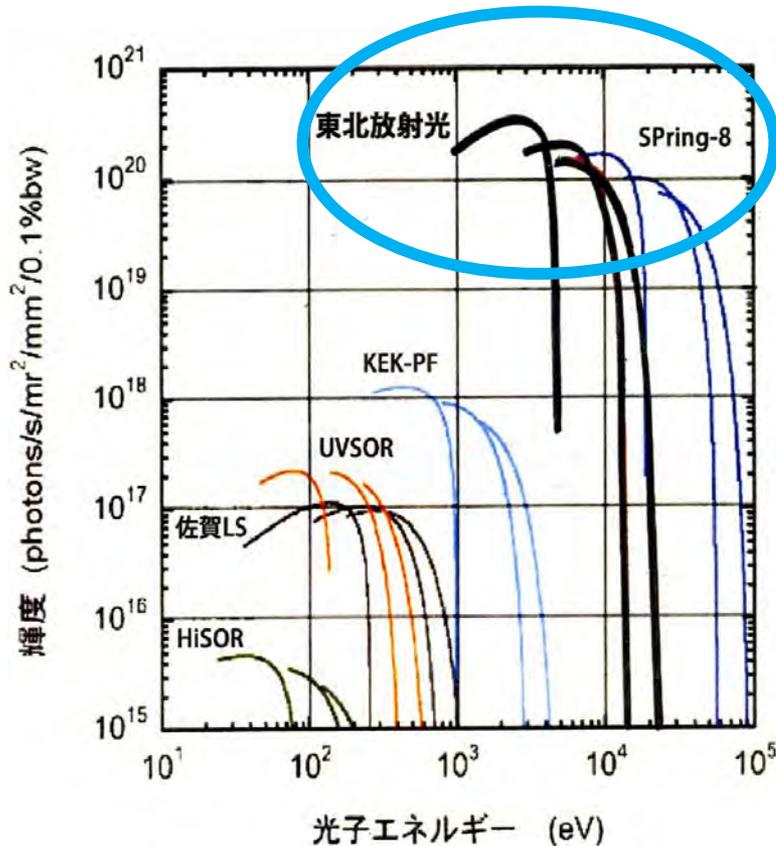
軟X線顕微鏡の開発とナノデバイスへの応用

スピントロニクス磁気デバイスの開発

上記の研究テーマの推進は、SPring-8, SPring-8 II では難しい。

東北放射光施設がもたらす国内放射光施設の協奏効果

SLiF-JとSpring-8 の2つが奏でる大きな相乗効果が十分期待できる
分析手法に「応じて最適なリングで 硬X線・軟X線 ナノアプリケーションの利活用

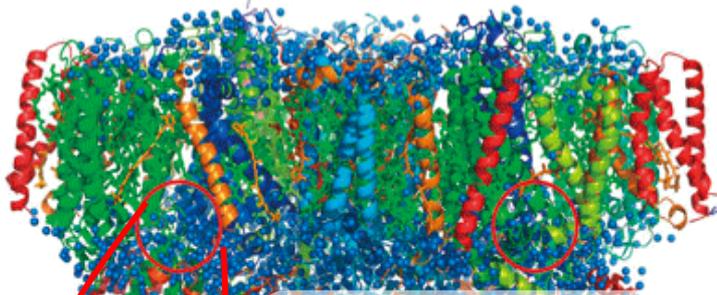


近未来の発生が予測される東南海沖地震に対しても、
リスク分散が十分可能

立体構造から機能解析へのパラダイムシフト 超高輝度軟X線でタンパク質研究の新時代へ

(多元研 稲葉謙次教授)

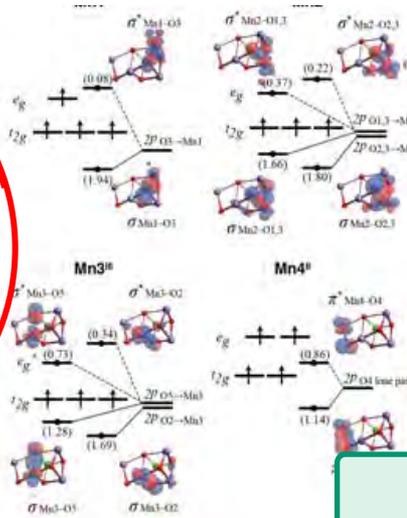
硬X線結晶構造解析



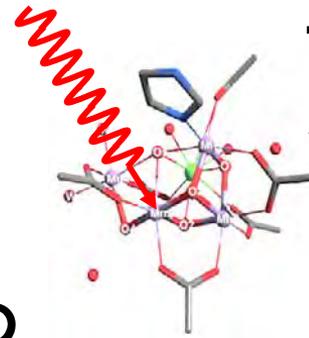
局所構造から光合成の
酸素発生過程を推測



酸素発生中心4核マンガン
クラスター



$h\nu_{in}$ 軟X線タンパク質機能解析



700000原子中に4個しか
ないマンガンを狙い撃ち

電子状態の精密解析により
タンパク質の機能を“見える化”

現状：0.0002%のタンパク質の分
析が10時間 @SPring-8

1000倍の輝度で30秒で分析が完了

電子論に立脚したプロテオミクスの時代へ！

放射光の産学連携研究と産業利用

(東大尾嶋正治教授)

機能を直接支配する電子状態の解析は産業利用に直結

特に動作中オペランド解析は死の谷の克服に必須

産学連携

産業利用

放射光利用
解析基礎研究

放射光利用
解析応用研究

放射光利用
劣化診断、信頼性

新物質・新物性発見、
新デバイス発明

新素材開発、
新デバイス開発

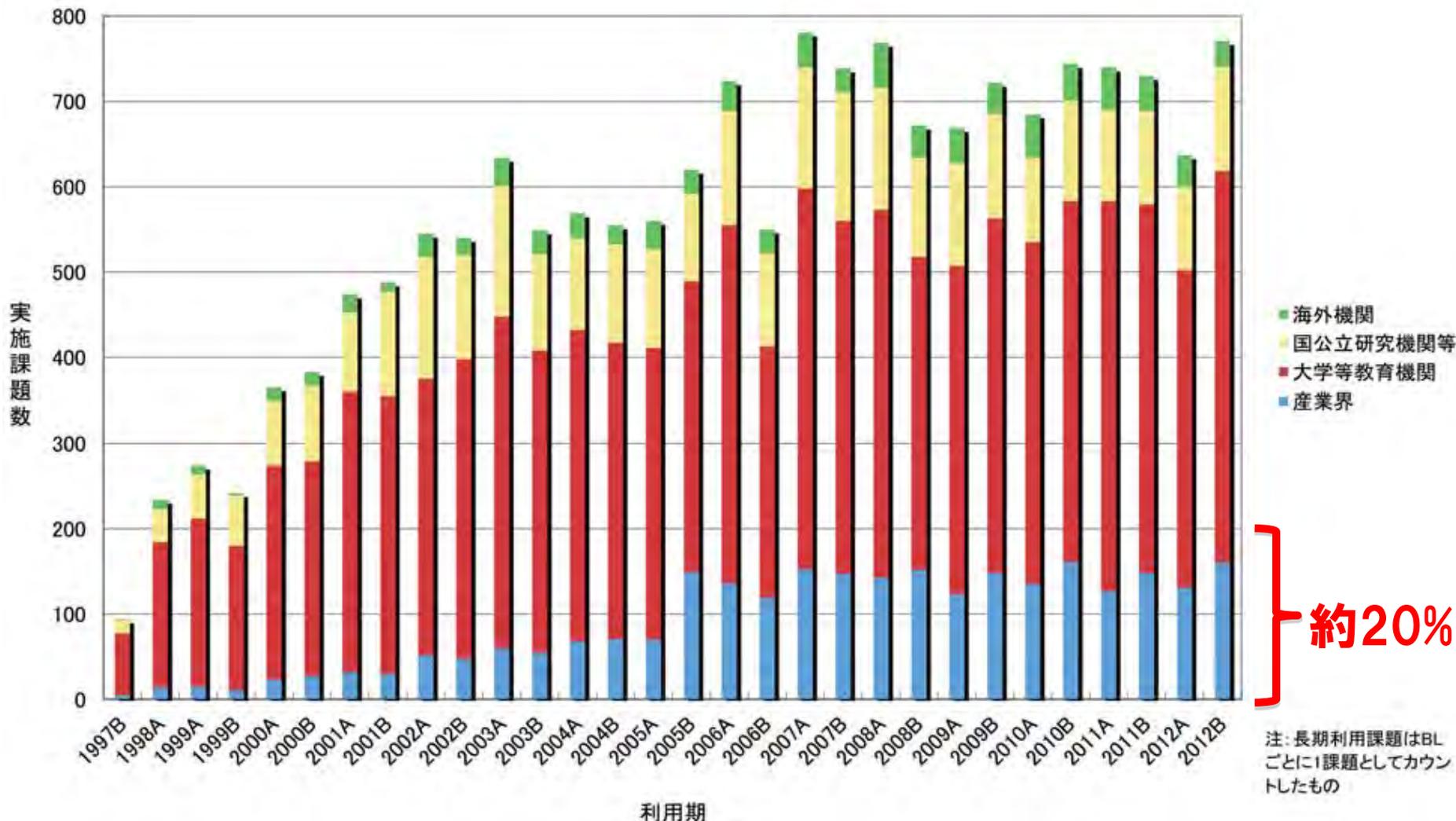
商品開発

"Valley of Death"

The Darwinian Sea



共用利用における、課題代表者の所属機関別に見た実施課題数の推移



民間企業が代表者として、**年間に約300件（全利用の約20%）**の利用研究を実施
 ただし、官学が代表者として実施された産官学連携課題が存在するため、**20%はミニマムBL27SUの実績から類推すると、年間で500～600件の産業利用・産官学連携利用を実施**

(株)ジーエス・ユアサ コーポレーション

ニッケル水素電池「eNi TIME」の開発

ニッケル水素電池の高性能化を実現するため、電池材料の構造と性能の相関を高輝度X線により解明。自己放電が従来に比べ大幅に抑制された製品を実現。



(株)ジーエス・ユアサ
コーポレーション
「eNi TIME」

住友ゴム工業(株)

高性能・高品質タイヤ「エナセーブ」の開発

タイヤのグリップ性能と燃費の向上の鍵を握る構造デザインを、SPring-8を使った構造情報とスパコンによるマルチスケールシミュレーション「4D NANO DESIGN」により成功。6%の燃費向上を実現した低燃費タイヤ「エナセーブ PREMIUM」の製品化を実現。



住友ゴム工業(株)
「エナセーブ PREMIUM」

「大型放射光施設SPring-8利用による経済波及効果を調査」(H19.9に実施)。その結果、インフラ整備や人の雇用などを除いた、純粋な経済活動のみで1997年から2006年のSPring-8利用による経済波及効果を総計すると

1,655億円～2,282億円と試算された。(三菱総合研究所)

課題解決を続ける SPring-8

地元(東北)企業の放射光施設利用状況

現状では、大学教員等との共同研究としての利用
東北パイオニア、TDK、JFE条鋼、東北鉄骨橋梁、八戸ハイテック
、弘前航空電子、アイリスオーヤマ、DOWAメタルマイン等

東北(SLiT-J)構想では、計画当初から産業応用
を意識した取組みを整備 (Spring-8:PF それぞれ5,6本程度)

例1. 5本程度の産業専用ビームライン(例:創薬・触媒)

例2. ナノアプリケーションをルーチン化(例:サンプル持参のみ)

例3. 放射光利用バンク(仮称)の整備

+ 東北各県のもつ課題に応じた利用促進の後押し

東北6県が、それぞれの目的に応じて世界最高水準の東北放射光施設(SLiT-J)を利活用して、継続的な発展・革新を成し遂げる



今日の東北の課題解決は、明日の日本の課題解決

例1：科学の力で農林水産業の革新

高付加価値化等の課題を解決し、TTPや低価格競争による消耗からの脱却

例2：科学の力で汚染状況の正確な把握

効率的な除染法の確立、安全安心の復興、国際的信用の早期回復 [注：既存の検出器では測定不可能な微小量も可]

農林水産業革新を実現する農商工戦略連携の拠点

高付加価値化の課題を解決し、TTPや低価格競争による消耗からの脱却へ

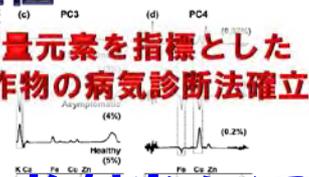
生産者



加工業者

高生産性

微量元素を指標とした
農作物の病気診断法確立



低環境負荷

人為的に放出されたナノ粒子が
食物連鎖が与える影響を解明



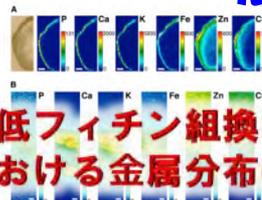
廃棄物低減



放射光ナノアプリケーションによる
農林水産資源の精密分析例

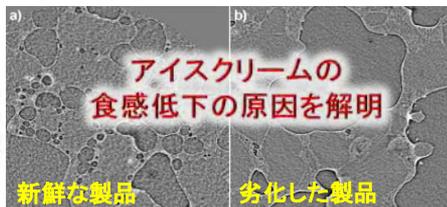


低フィチン組換え米に
おける金属分布の分析

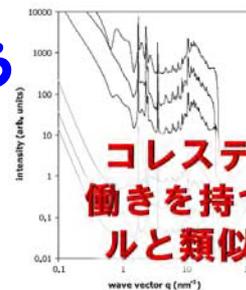


安全・安心

アイスクリームの
食感低下の原因を解明



高品質



コレステロールを下げる
働きを持つ、植物ステロール
と類似した油脂の開発

健康増進



販売業者

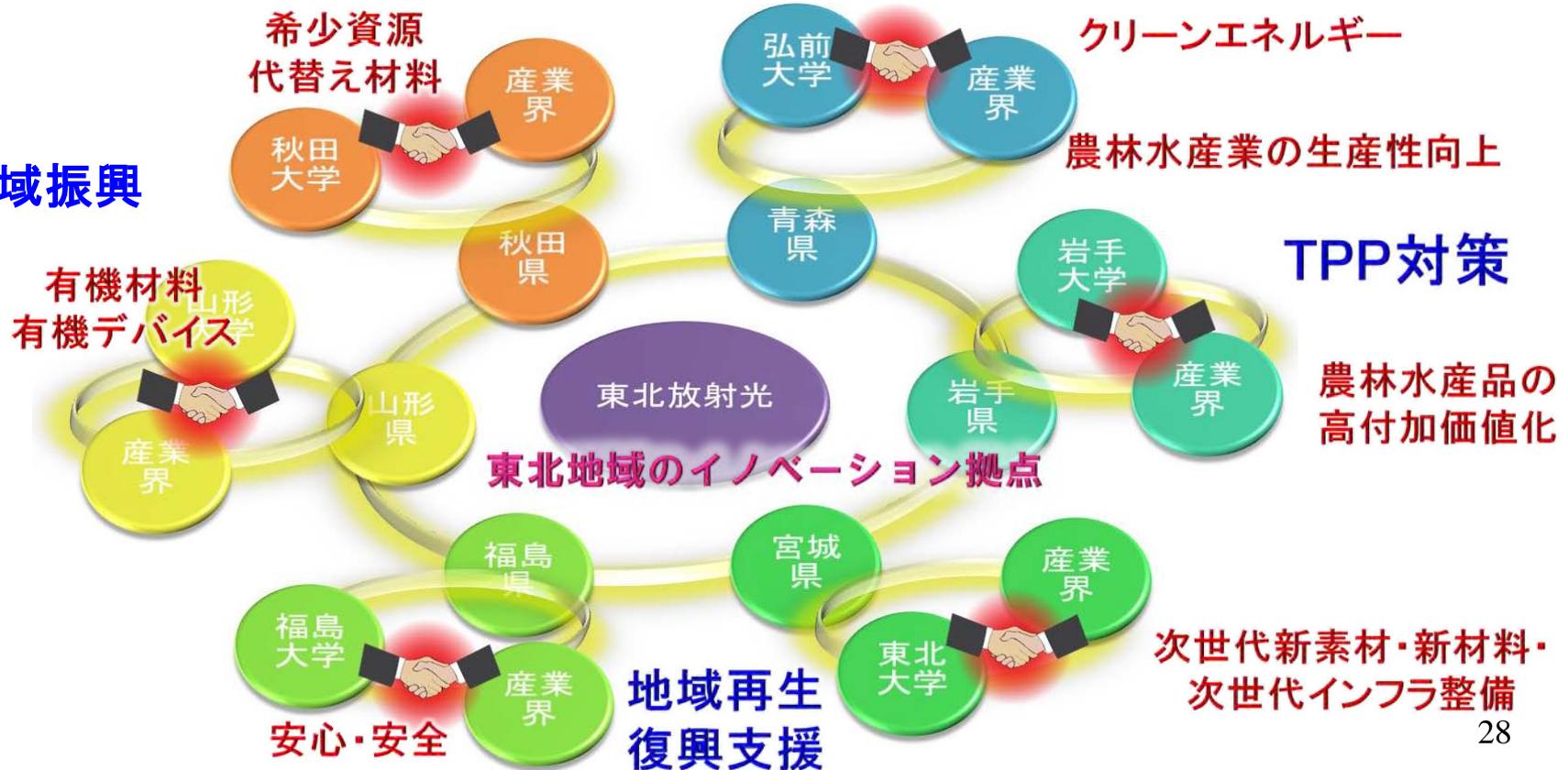


ソリューション： “東北から発信する国際ブランド” を創成 27

SLiT-J が目指す課題解決型イノベーションサイクルモデル

- ・東北6県の自治体・7大学・6高専等が密接に連携共働し、企業のシーズ+ニーズを積極的に取り上げ、ベストなマッチングを図る
- ・東北放射光施設(SLiT-J)を、知と産業化を結び、基礎科学に裏付けされた戦略的に課題解決を図る「地域結集型イノベーション拠点」とする

地域振興



皆様のおかげで一步、一步 前進中です。でも、

「東北放射光施設」の実現には、あと一押しが不可欠です

東北大学 電子光物理学研究センター内に設置した「推進室（室長：濱広幸教授）」に、東北の情熱と All Japanの支援を結集して粘り強い、かつ 継続的な ご支援をよろしくお願いします