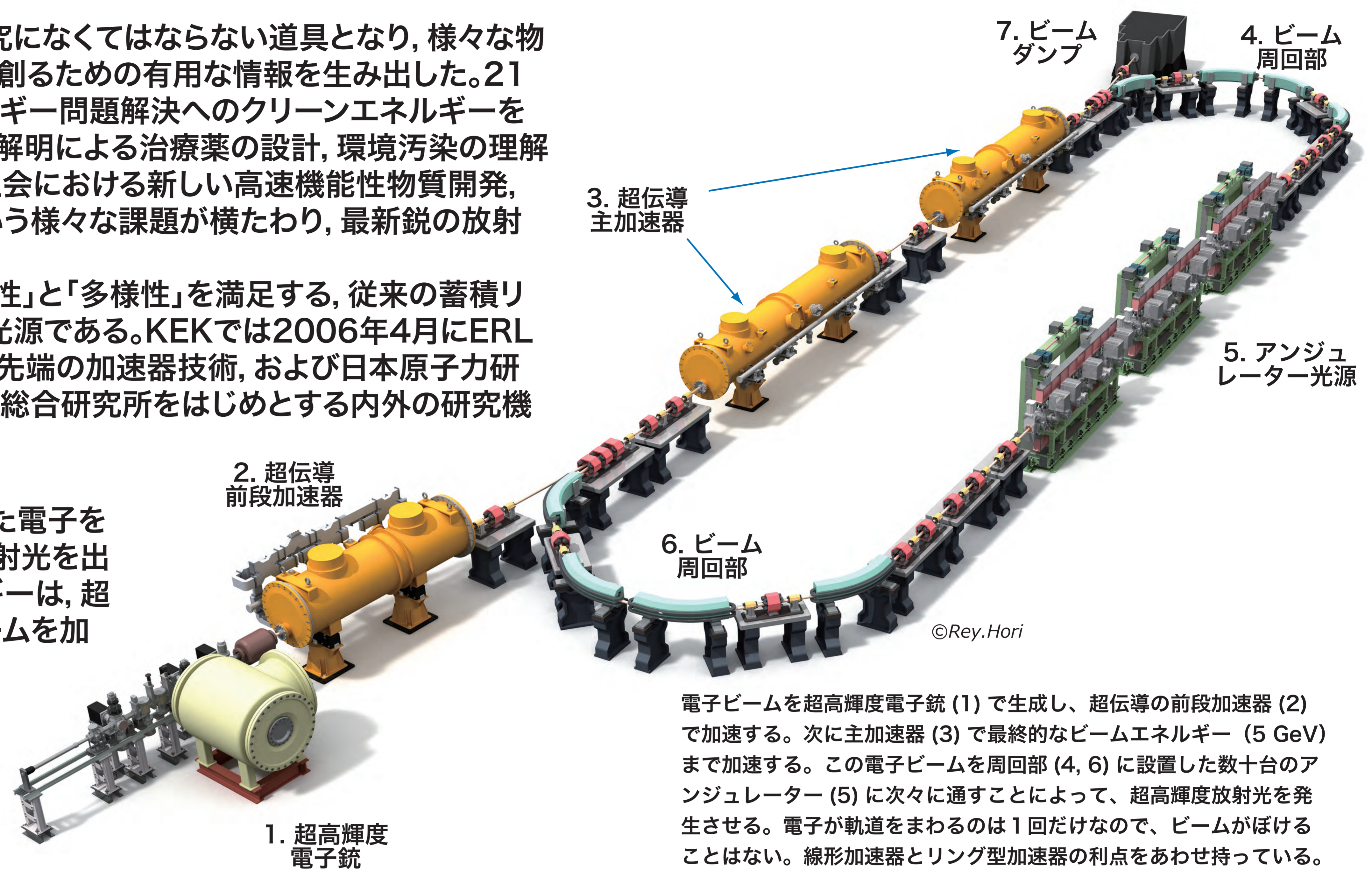


# ERL Energy Recovery Linac

放射光は、20世紀後半から多くの分野の研究になくてはならない道具となり、様々な物質の構造や機能を解き明かし、新しい物質を創るための有用な情報を生み出した。21世紀の今、枯渇の危機が叫ばれているエネルギー問題解決へのクリーンエネルギーをベースとした新物質開発、生命現象と病原の解明による治療薬の設計、環境汚染の理解とその除去方法の開発、高速化する情報化社会における新しい高速機能性物質開発、人工的に制御された新しいナノ物質開発という様々な課題が横たわり、最新鋭の放射光源への期待が益々広がってきている。

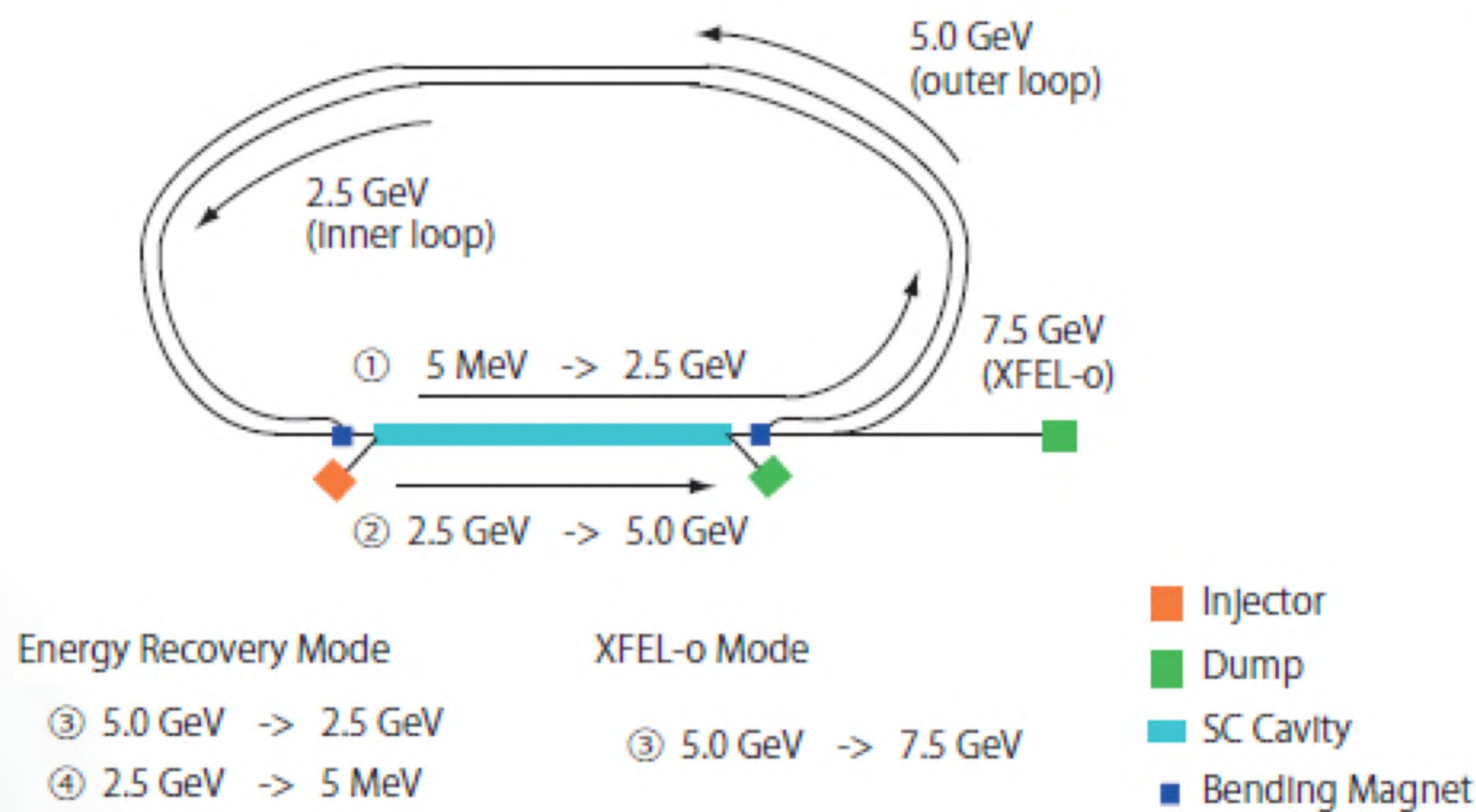
エネルギー回収型ライナック、ERLは、「先端性」と「多様性」を満足する、従来の蓄積リング型放射光源を超える新しい次世代放射光源である。KEKでは2006年4月にERL計画推進室を設置し、機構内で培ってきた最先端の加速器技術、および日本原子力研究開発機構、東京大学物性研究所、産業技術総合研究所をはじめとする内外の研究機関との協力の下、ERLの開発を進めている。

ERL光源加速器は、超伝導加速器で加速した電子を利用して、超高輝度の放射光を発生する。放射光を出し終えて不要になった電子ビームのエネルギーは、超伝導加速器を通して回収され、次の電子ビームを加速するために利用される。電子ビームの特性は超高輝度電子銃で定まり、従来の蓄積リング型放射光源と比べて輝度を2~3桁高く、パルス幅を2~3桁短くすることができると期待されている。



電子ビームを超高輝度電子銃(1)で生成し、超伝導の前段加速器(2)で加速する。次に主加速器(3)で最終的なビームエネルギー(5 GeV)まで加速する。この電子ビームを周回部(4, 6)に設置した数十台のアンジュレーター(5)に次々に通すことによって、超高輝度放射光を発生させる。電子が軌道をまわるのは1回だけなので、ビームがぼけることはない。線形加速器とリング型加速器の利点をあわせ持っている。

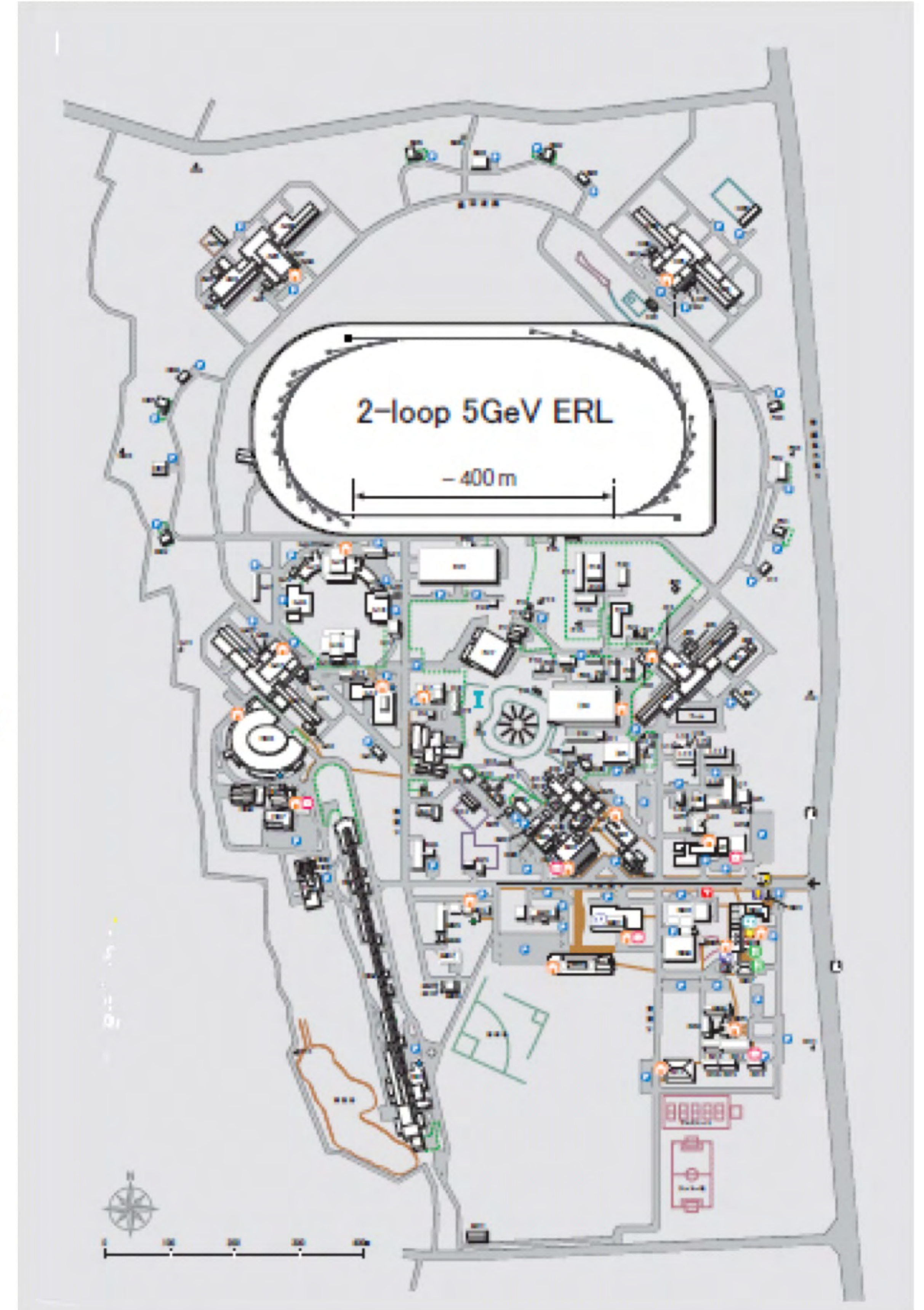
## 次世代光源 ERL (5 GeV ERL) の基本設計



ERL, SASE-FEL, XFEL-O の比較

	average brilliance	peak brilliance	repetition rate (Hz)	coherent fraction	bunch width(ps)	# of BLs	Remark
ERL	~10 <sup>23</sup>	~10 <sup>26</sup>	1.3G	~20%	0.1~1	~30	Non-perturbed measurement
XFEL-O (Option)	~10 <sup>27</sup>	~10 <sup>33</sup>	~1M	100%	1	few	Single mode FEL
SASE-FEL	~10 <sup>22-24</sup>	~10 <sup>33</sup>	100~10K	100%	0.1	~1	One-shot measurement
3 <sup>rd</sup> -SR	~10 <sup>20-21</sup>	~10 <sup>22</sup>	~500M	0.1%	10~100	~30	Non-perturbed measurement

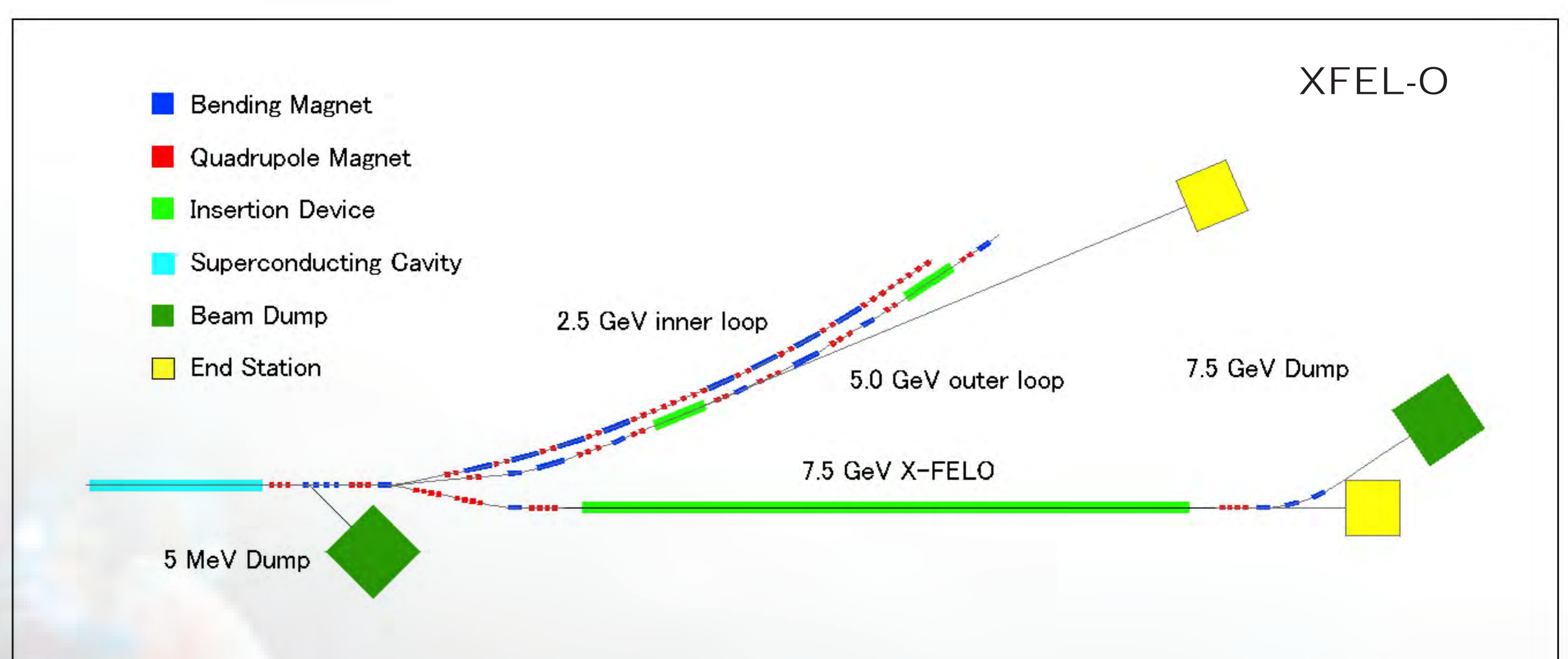
(brilliance : photons/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%/s @ 10 keV)



## 共振器型自由電子レーザー (XFEL-O)

共振器型X線自由電子レーザー(XFEL-O)は、単結晶がX線に対し直入射に近い条件で高い反射率を持つことを利用し、X線の光共振器を構成して、この中で電子ビームとX線パルスを多数回にわたり相互作用させてFEL発振を得るものである。2008年に、K-J. Kimらによって、ERLにおいてXFEL-Oを実現するアイデアが提案された(1)。時間コヒーレンスを備えたX線パルスを発生させることができ、時間・空間分解能、meVの高いエネルギー分解能を持つ光源として大きな可能性を持つものであり、5GeV ERLの重要なターゲットのひとつとして現在詳細設計を検討中である。

(1) K-J. Kim et al., Phys. Rev. Lett., 100, 244802 (2008).

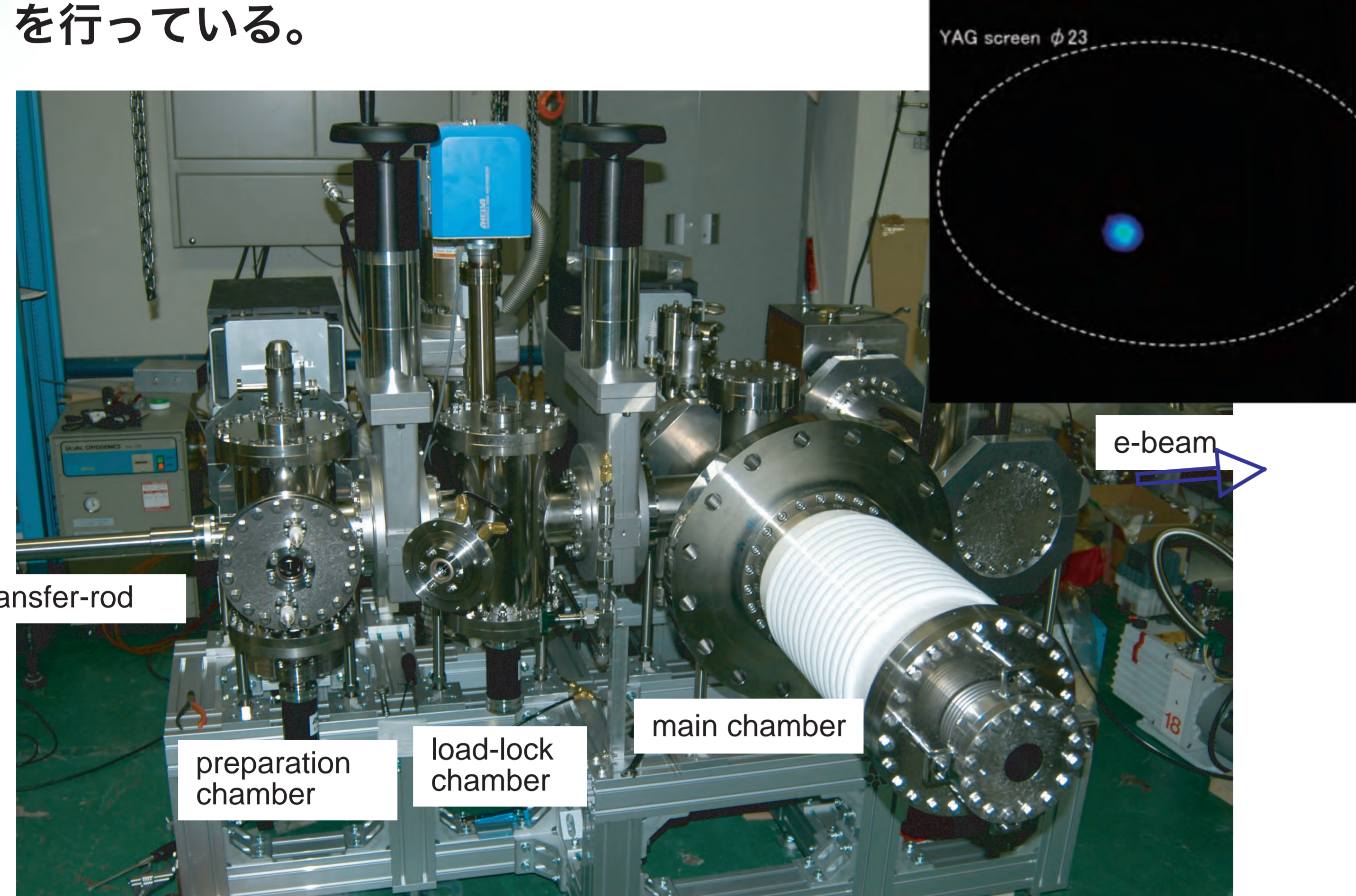




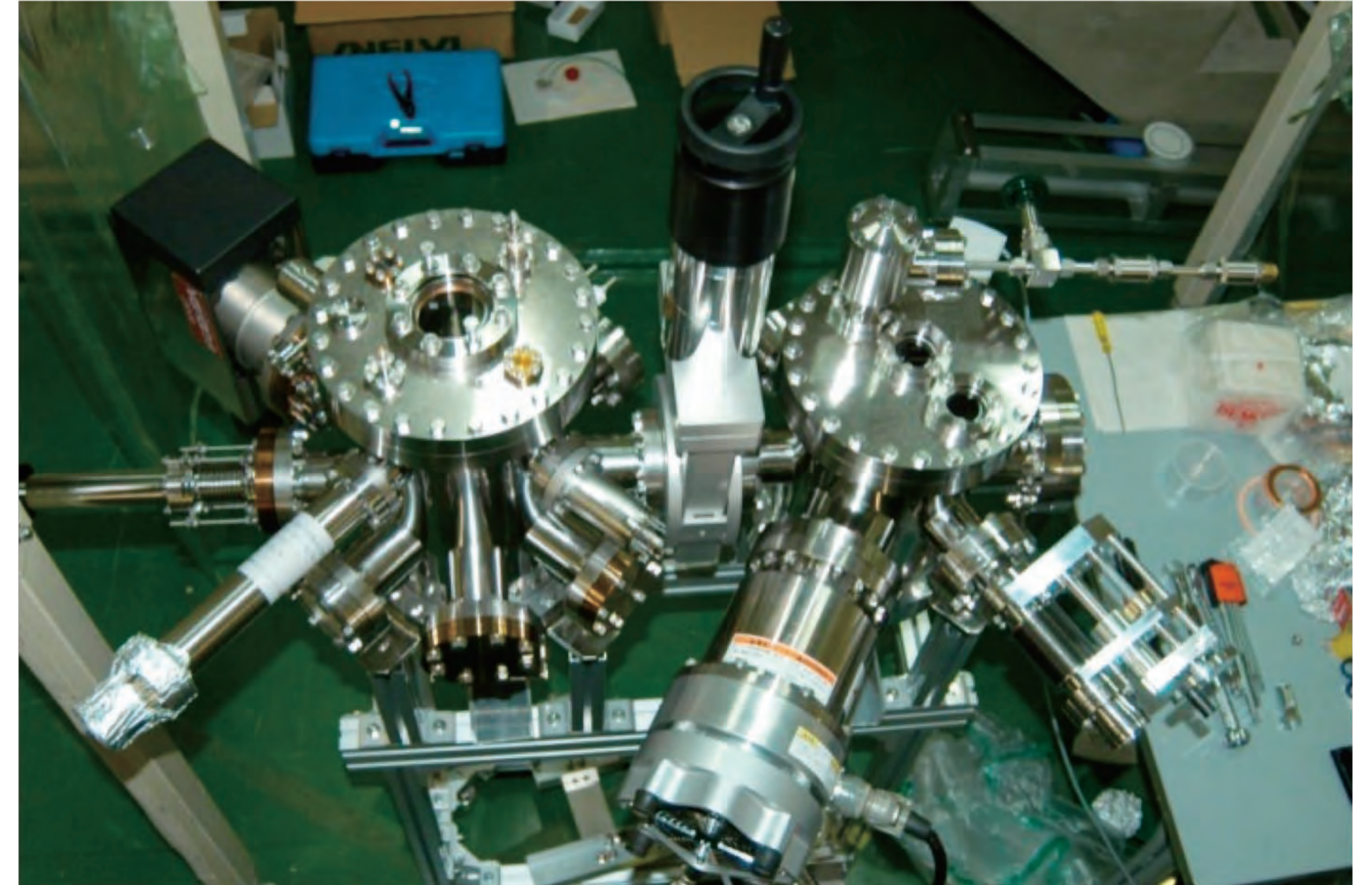
# ERL Energy Recovery Linac

## 電子銃

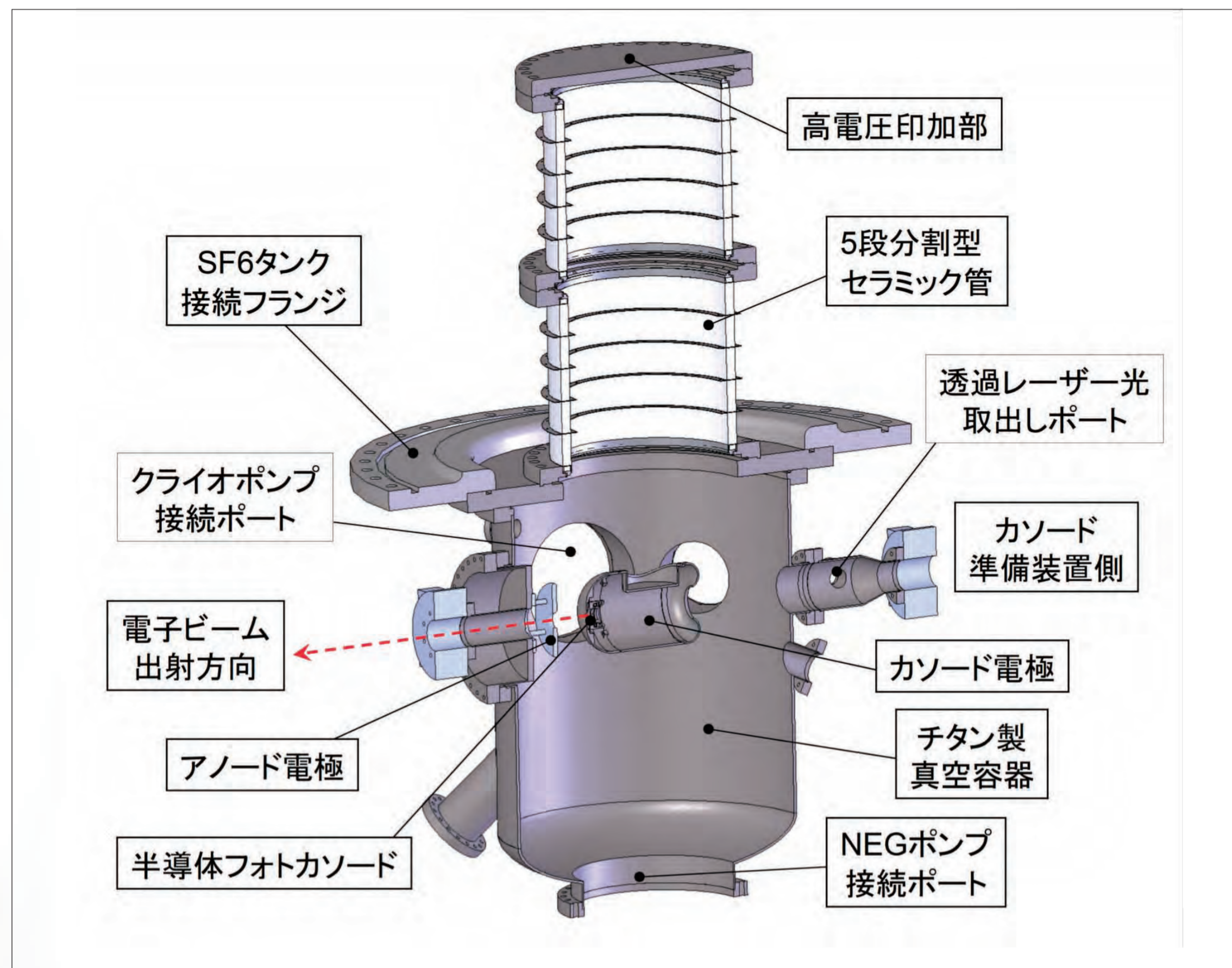
電子銃は ERL において電子ビームの性能を決定する重要なコンポーネントである。ドライブレザー光をフォトカソードに照射し、引き出した電子を直流高電圧で加速することにより、超高輝度の電子ビームを生成する。励起用の大出力ファイバーレーザー、負の電子親和力を持つフォトカソード材料、高電圧電極を組み合わせ、必要な性能を達成する。これまでに、先行試験機の 250kV 電子銃において、低エミッタンスビームを生成することに成功した。現在、実機である 500kV 電子銃の開発を行っている。



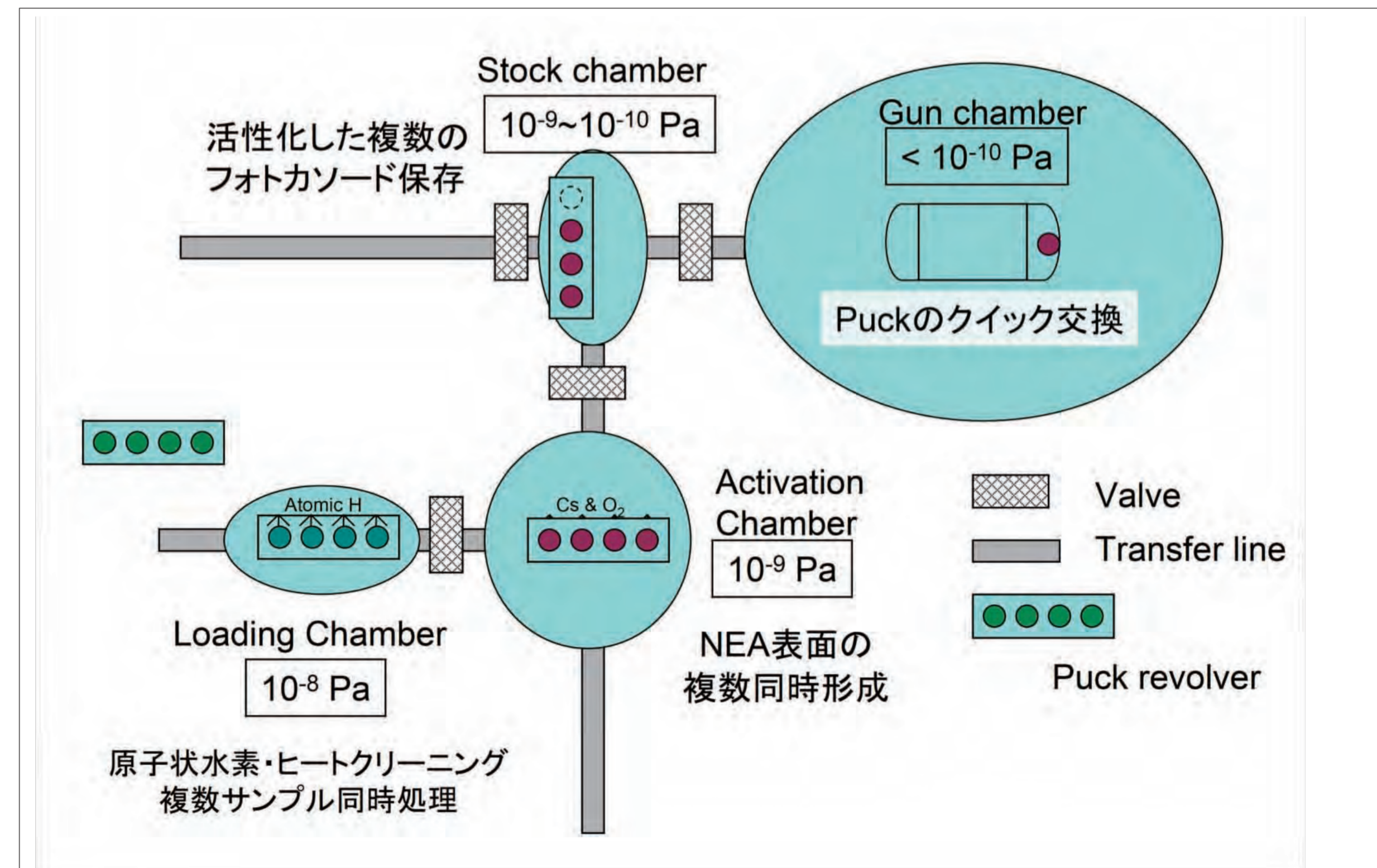
日本原子力研究開発機構 (JAEA) で開発された 250kV 電子銃。ビーム引き出し試験 (右上写真) に成功。



500kV 電子銃はすでに電圧印加試験を行った。全ての真空容器はガス放出の少ないチタンを材料としている。



500kV 電子銃の全体図



ビーム出力 10mA 以上という高出力では、フォトカソードの寿命は十分に長くない。そのため、カソードを常時複数待機させておくシステムを開発している。カソードの準備には、加熱洗浄・冷却・表面の形成という 3 ステップが必要であり、複数同時に処理を行うことができる。

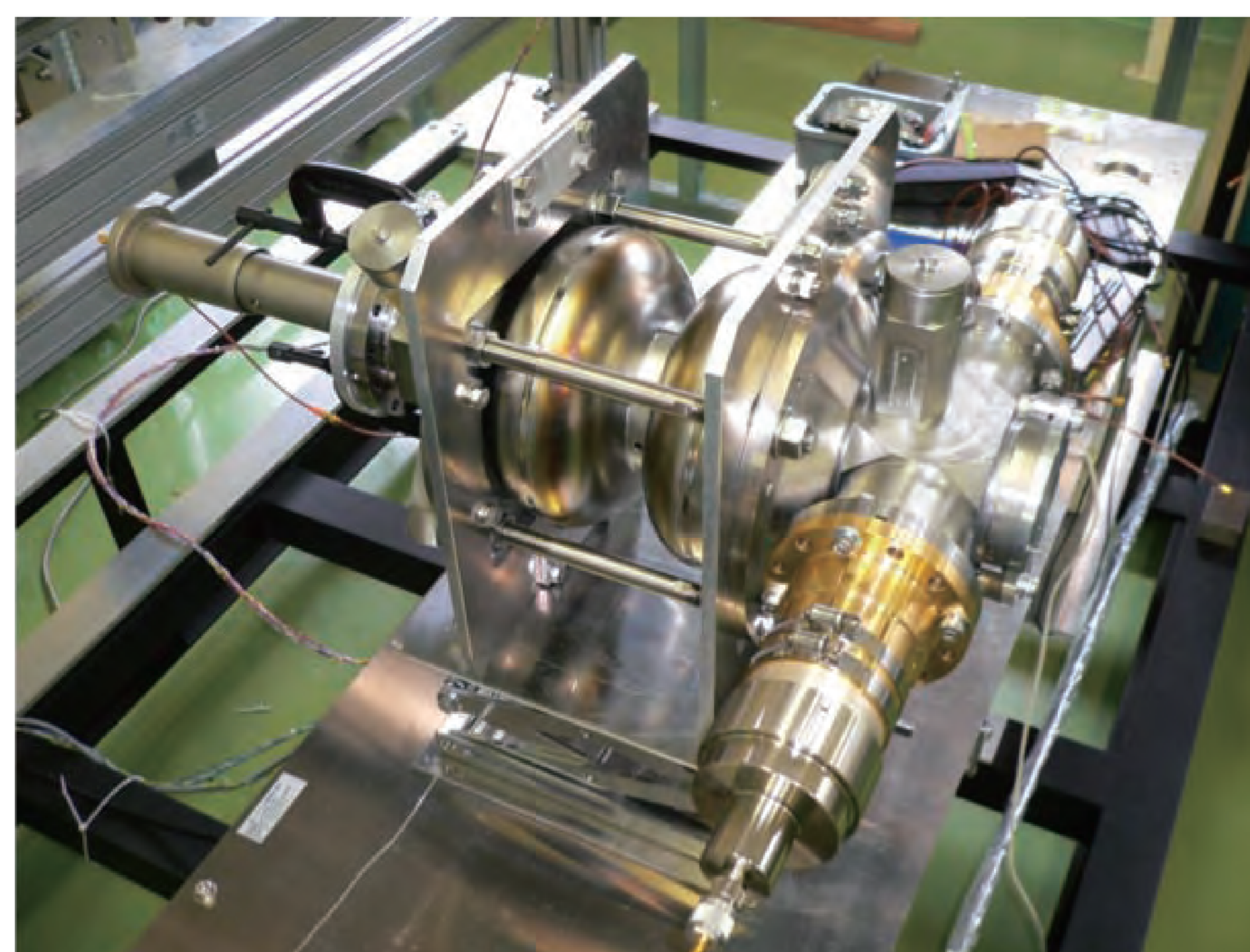
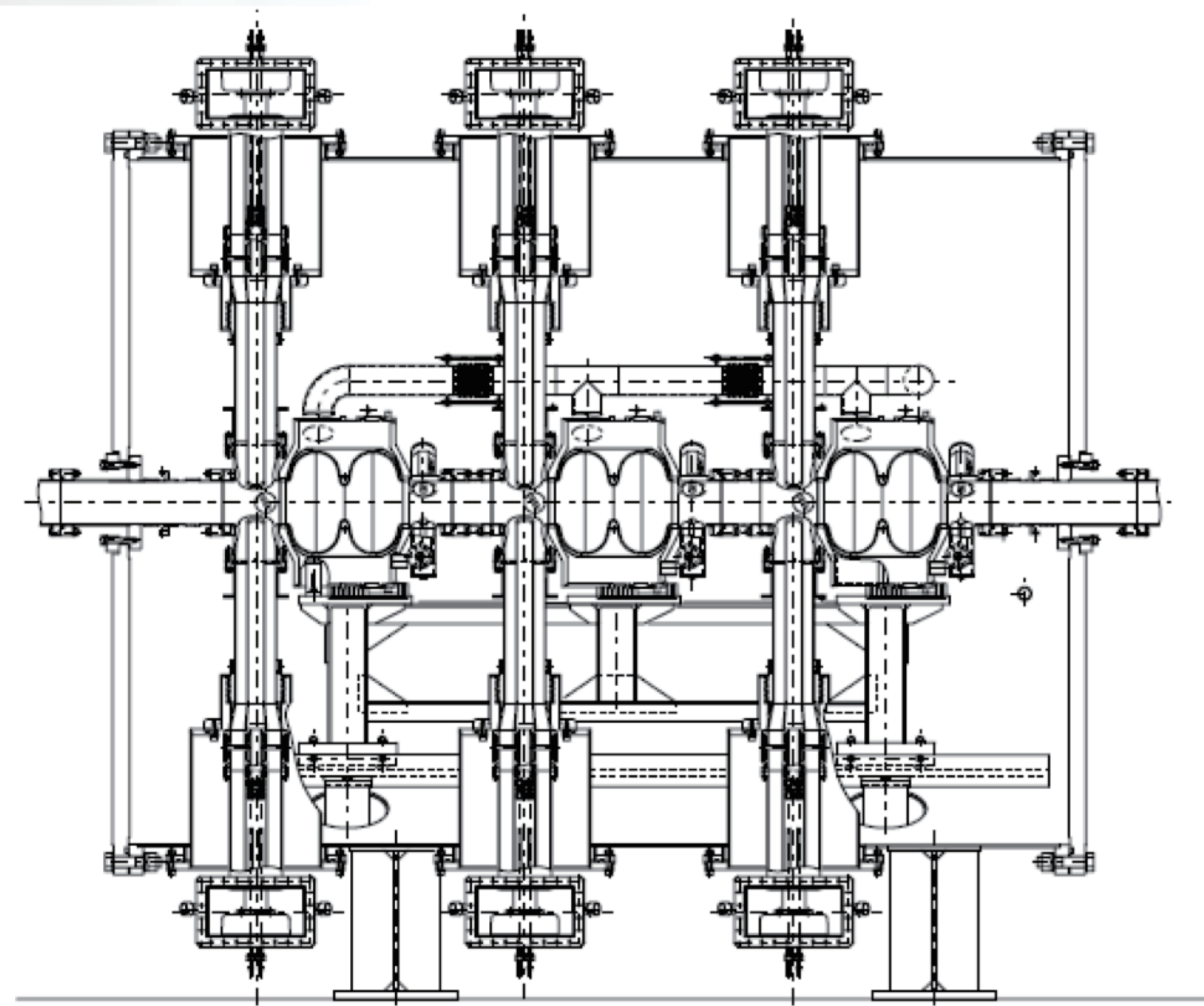


フォトカソード材料 GaAs 結晶の加熱洗浄

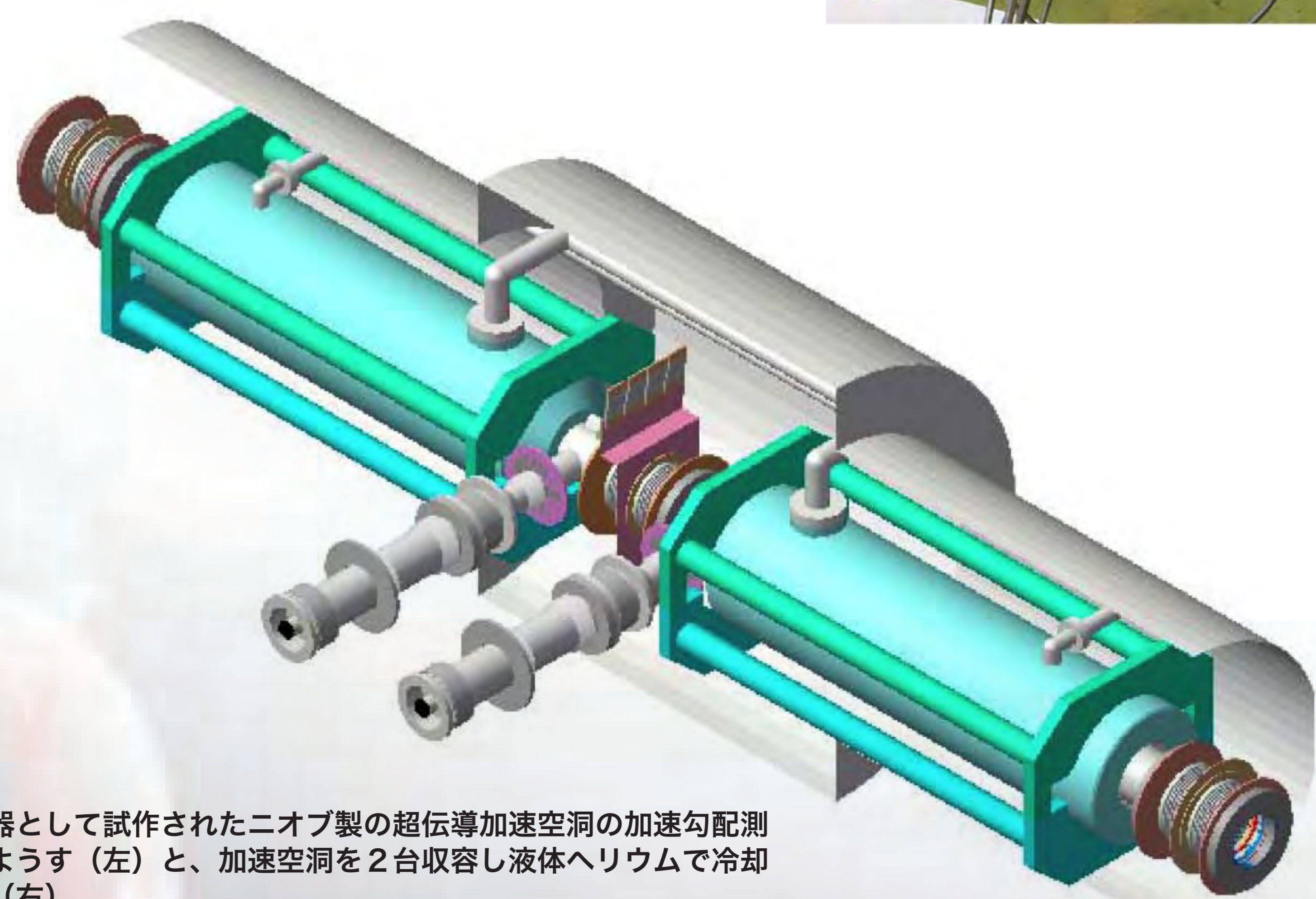
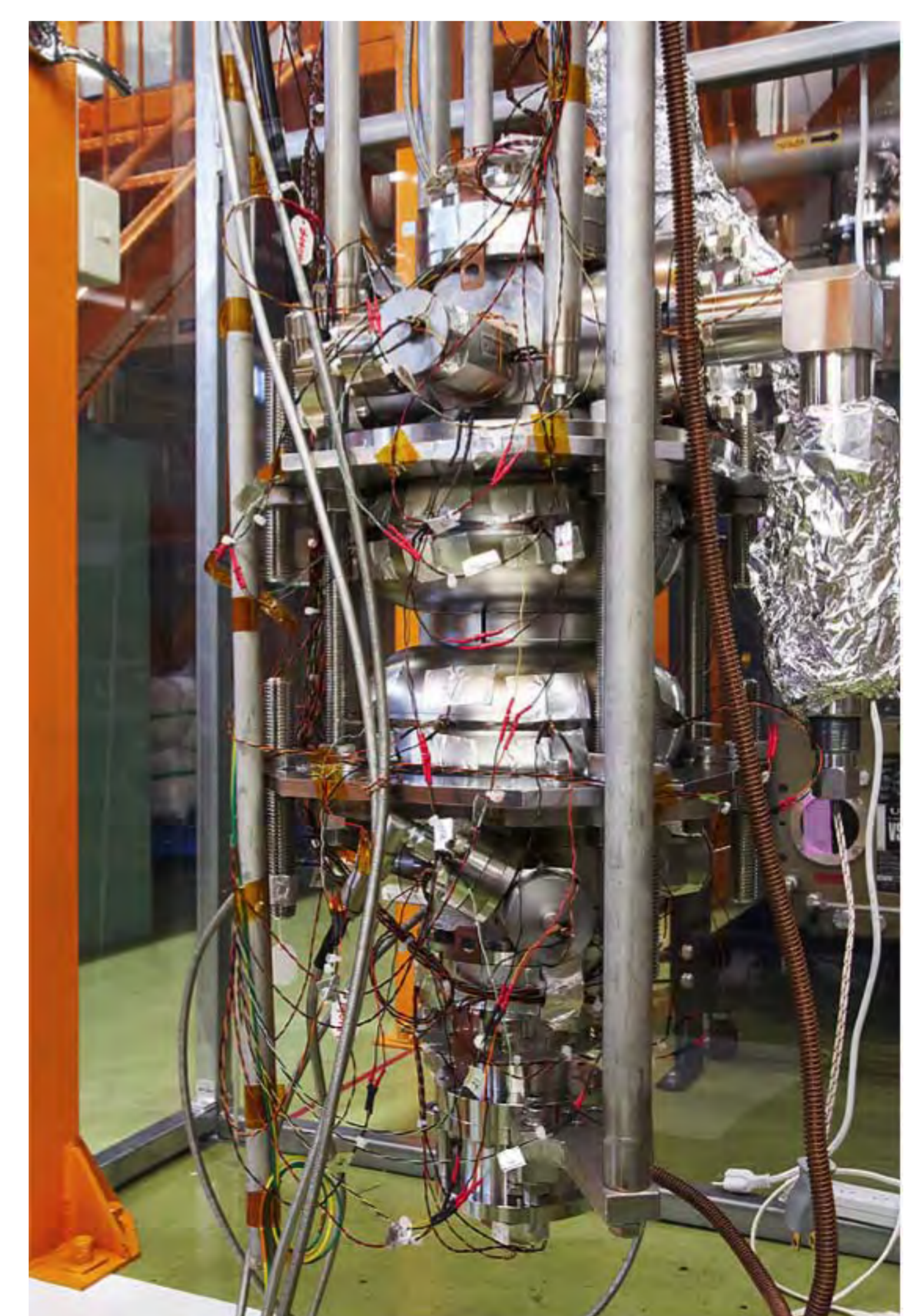
## 超伝導加速空洞

超伝導加速空洞は、高周波電力を投入して、ビームの加速に必要な高周波電場を発生する装置である。近年急速に進歩している超伝導技術を用いることで、高電界かつ高効率の加速が実現できる。

ERL では、入射用の前段加速器、および主加速器といった主要なコンポーネントで用いられる超伝導加速器は、鍵となる技術である。加速空洞の表面に傷や塵が存在すると超伝導が損なわれるので、電界研磨や超純水高圧洗浄などの表面処理技術を駆使してそれらを除去する。



ERL の前段加速器で用いられる超伝導加速空洞。

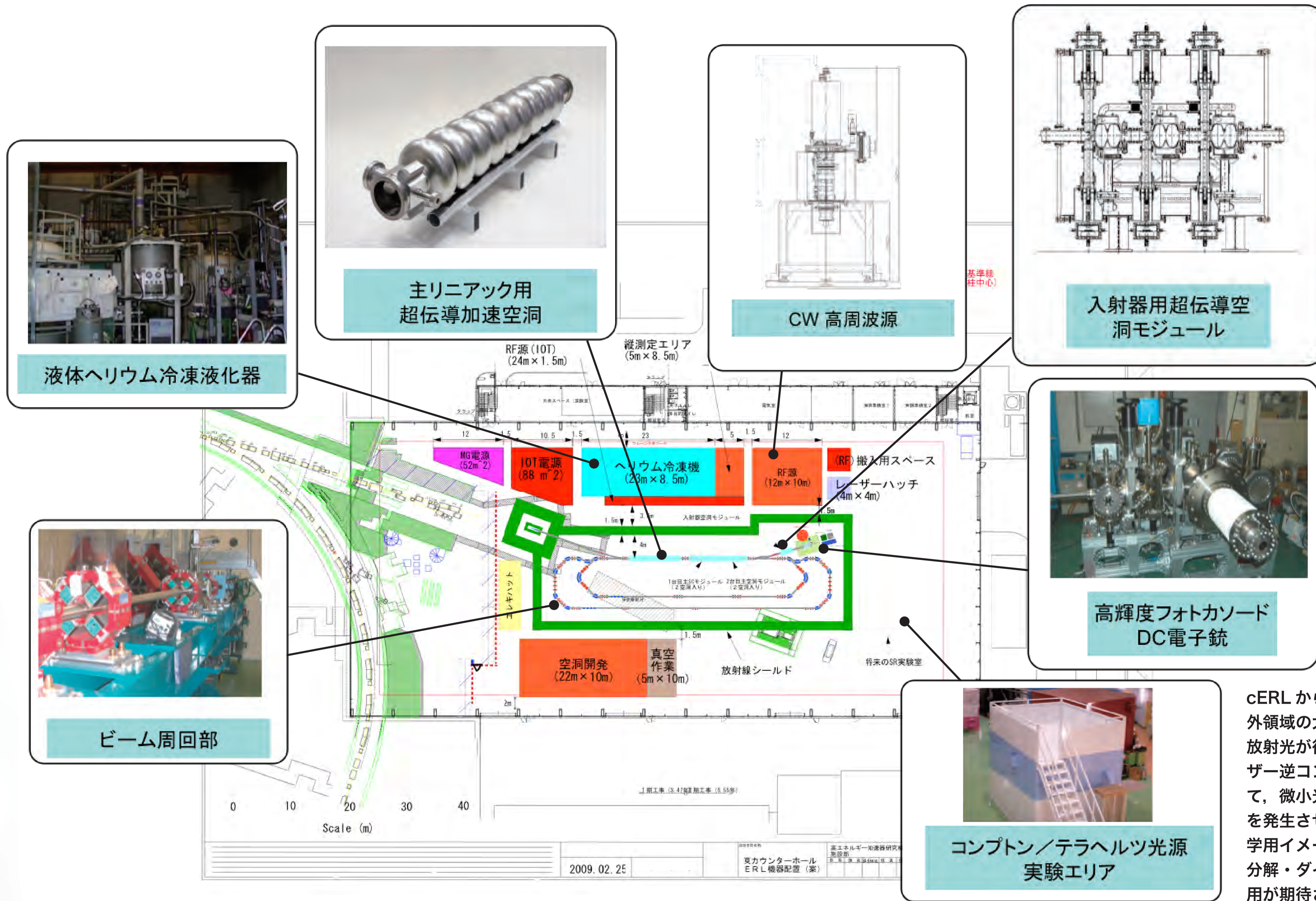


ERL の主加速器として試作されたニオブ製の超伝導加速空洞の加速勾配測定 (縦測定) のようす (左) と、加速空洞を 2 台収容し液体ヘリウムで冷却するモジュール (右)。



### コンパクト ERL

次世代の光源加速器 ERL の実現には開発しなければいけない技術が多く残されている。そのために KEK では小型の ERL 加速器を作ることから最初の一步を踏み出すこととした。X線領域の光を発生するには 50 億電子ボルト (5GeV) クラスのエネルギーの ERL が必要であるが、このテスト用の ERL 実証機「コンパクト ERL (cERL)」は、6000 万~2 億電子ボルト (60~200MeV) 程度のエネルギーのものが計画されている。コンパクト ERL は、2005 年度にその役目を終えた陽子加速器の実験施設、東カウンターホールに建設される。現在、建物の整備が急ピッチで進んでいる。



cERL からはテラヘルツ・遠赤外領域の大強度のコヒーレント放射光が得られる。また、レーザー逆コンプトン散乱を利用して、微小光源でフェムト秒 X 線を発生させることができる。医学用イメージング研究や、時間分解・ダイナミクス研究への応用が期待される。



2008/11/18



2009/8/26



東カウンターホール外観 (2009/8/26)

東カウンターホールの整備の様子

### ERL 計画スケジュール

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
<b>コンパクト ERL</b>											
設計	—————										
要素技術の開発	- - - - -										
建設				- - - - -							
試験運転						—————					
ユーザー運転						- - - - -					
<b>5GeV ERL</b>											
設計				- - - - -							
建設								—————			

予算などの状況により変更の可能性あり



### ERLで展開するサイエンスは？

高繰り返しのコヒーレント放射光，100フェムト秒放射光パルス性といった，ERLの先進的な光から期待されるサイエンス。

- ・不均一系の科学  
(触媒，デバイス，薄膜・界面，生物等の局所・原子/電子・構造)
- ・時間分解測定法による物質研究
- ・時空間スケールの階層構造  
(高分子，相転移，細胞等の空間および時間空間における揺らぎを含めた階層構造)

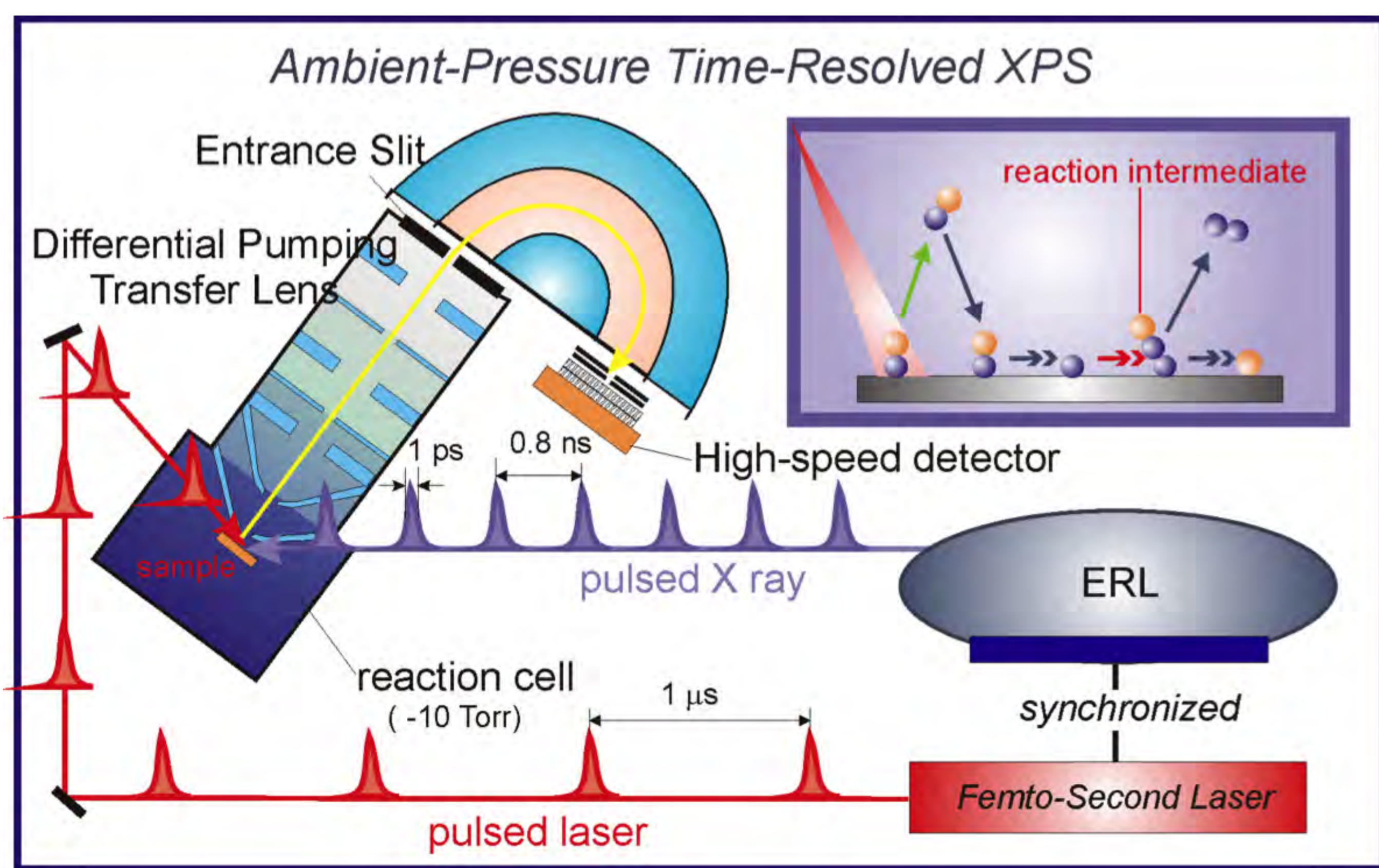
これらのサイエンスの方向性の展望と，極限を実現するための装置技術について検討を行うことを目的とした「ERLサイエンスワークショップ」が2009年7月9日～11日にKEKにおいて開催された。

ワークショップのプロシーディングスは，KEK Proceedings 2009-4として出版されている(pdf版は下記URLからも入手可能)。  
 ERLサイエンスワークショップ：<http://pfwww.kek.jp/pf-seminar/ERL/workshop/>



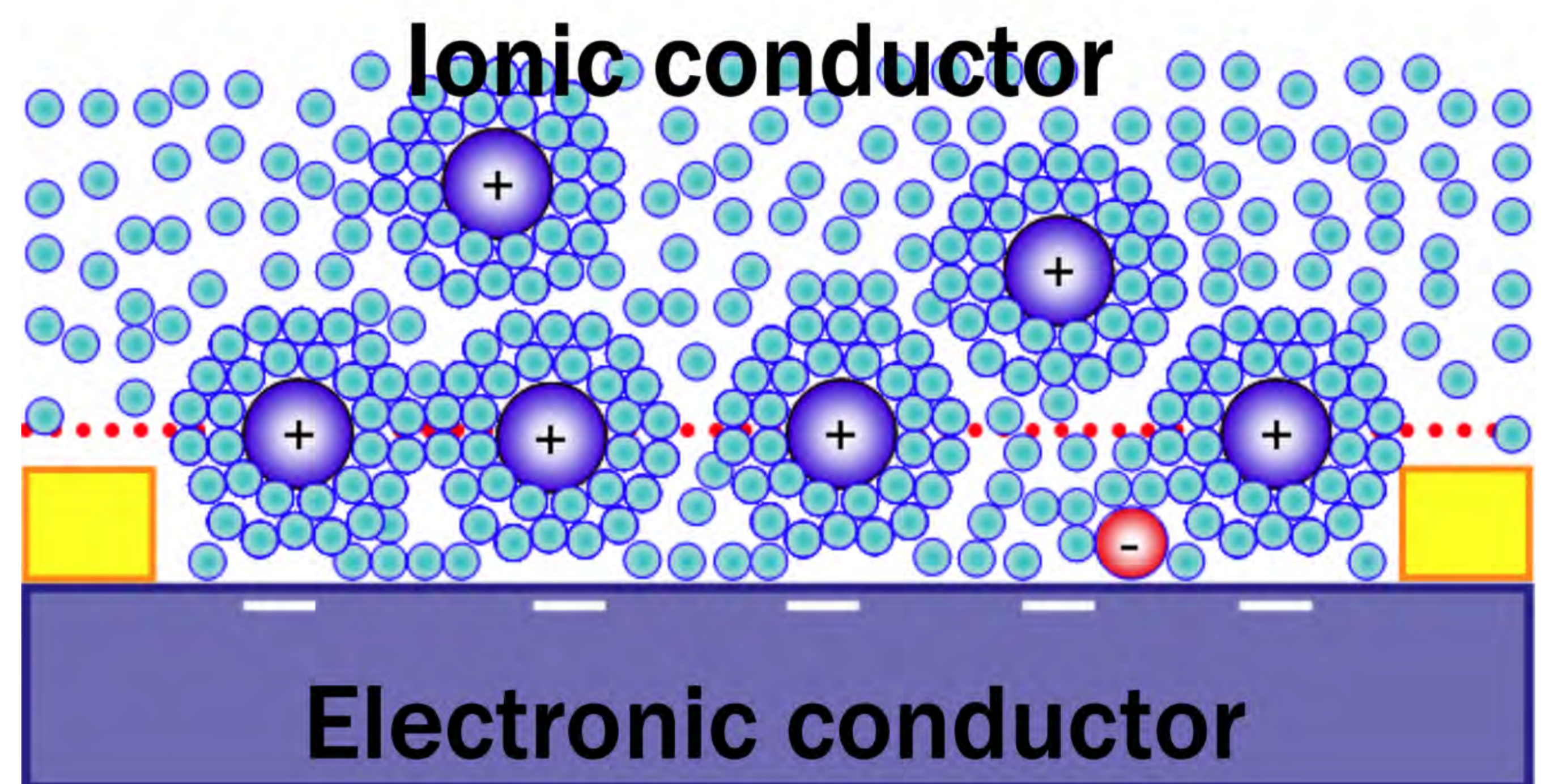
### 具体的な研究対象は？

表面・界面における化学反応の研究 (慶応大学 近藤寛先生)



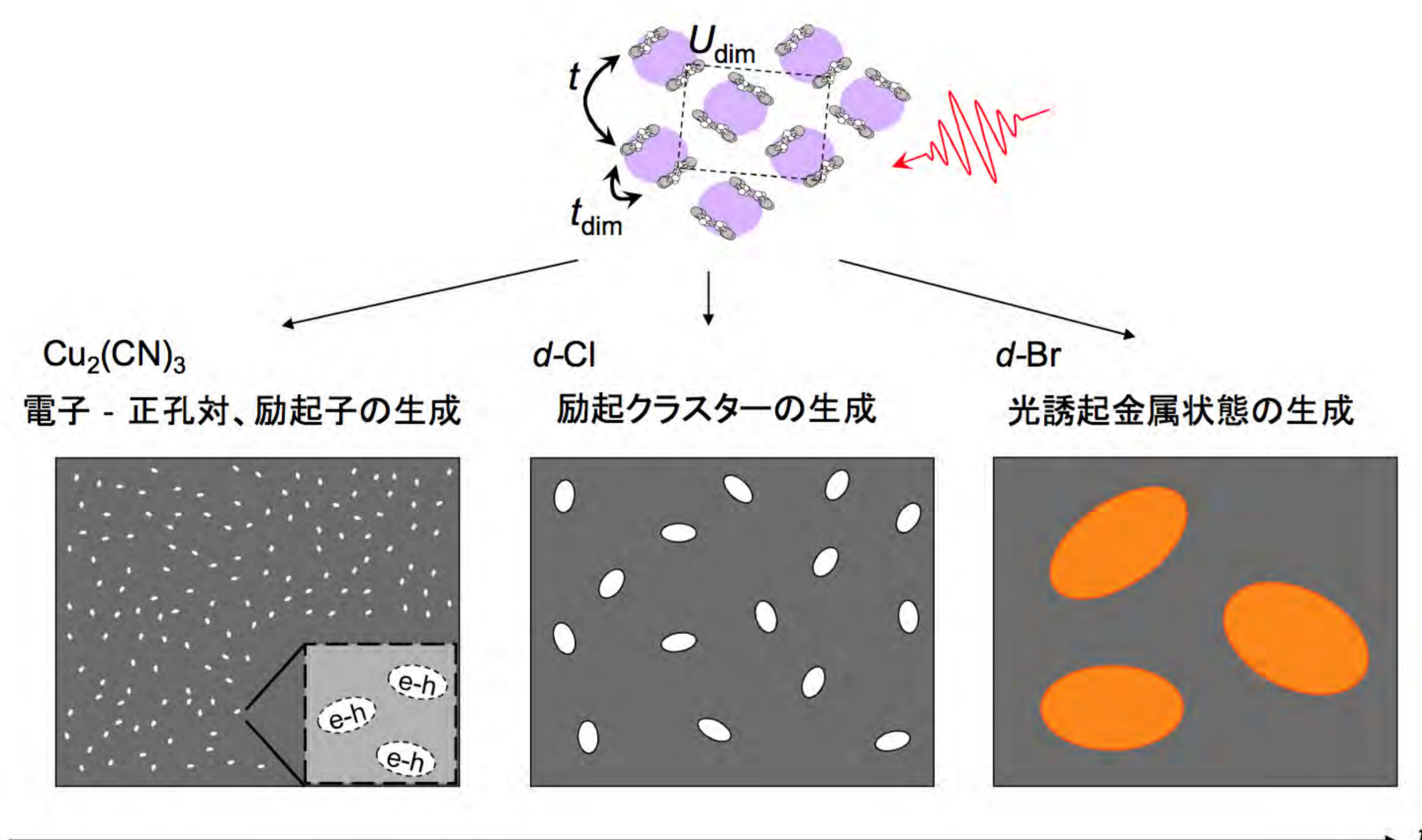
MHz オーダーのレーザーパルスをトリガーにし，それによって誘起されるプロセスをピコ秒X線パルス励起の光電子でプローブする。例えば，レーザー誘起脱離で表面の分子を脱離させ，気相からの分子の再吸着に伴う反応プロセスの進行をモニターし，表面反応の高速キネティクスを観測する(右上図)。

非平衡固液界面の電子物性 (東北大学 岩佐義宏先生)



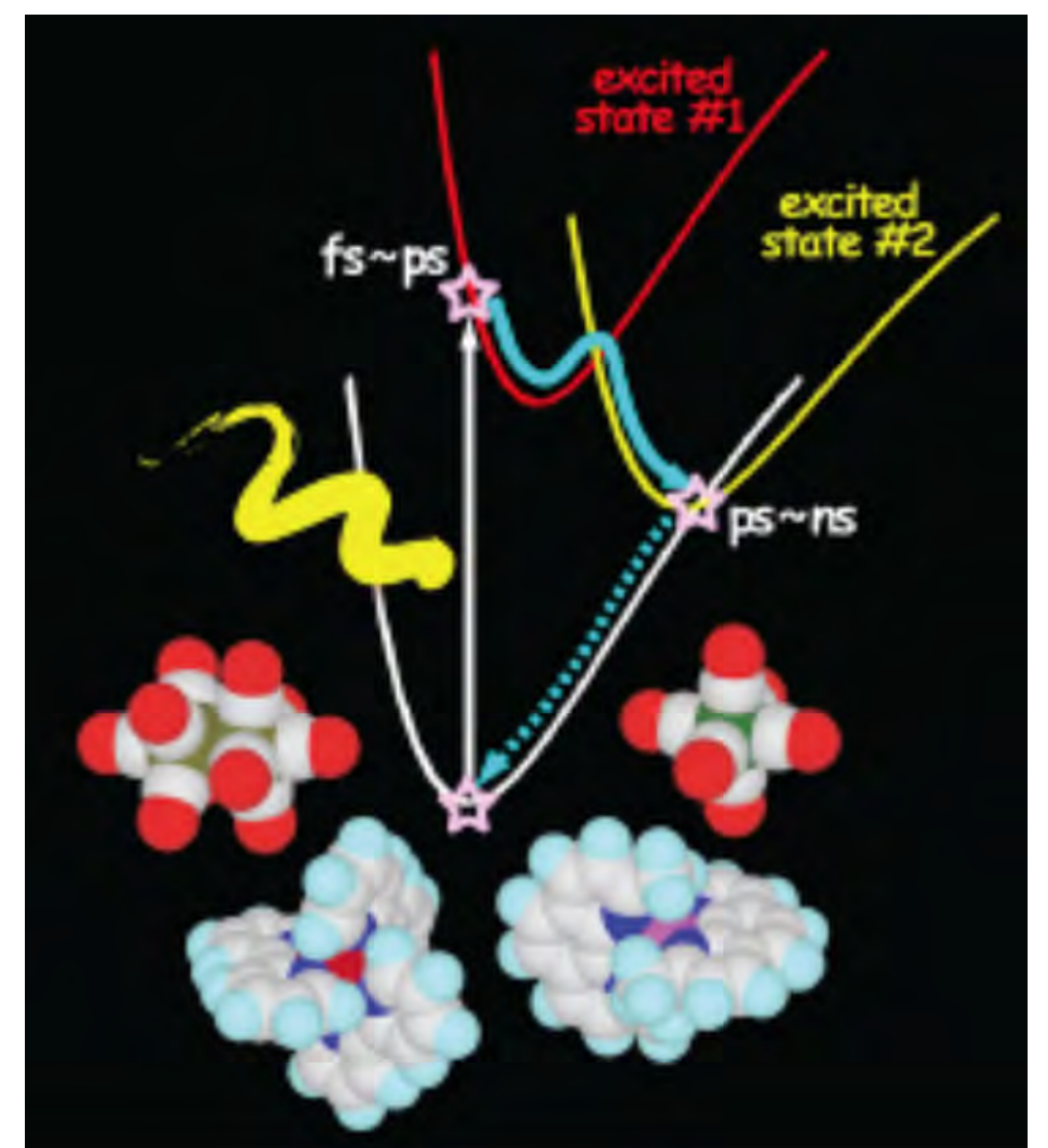
液体(イオン伝導体)と固体(電子伝導体)の界面に電圧を印加すると，液体中のイオンが移動し，電子伝導体表面に電気二重層(EDL)と呼ばれる層が形成される。この層には大容量の電荷蓄積ができることが知られており，すでにデバイスとして実用化されているものもあるが，有機半導体や酸化物半導体に適用することにより，驚くべき電子物性が発現することが次々と明らかになっている。ERLはこのような界面の局所構造と局所電子状態を明らかにする。

有機伝導体における光誘起相転移の超高速分光 (東北大学 岩井伸一郎先生)



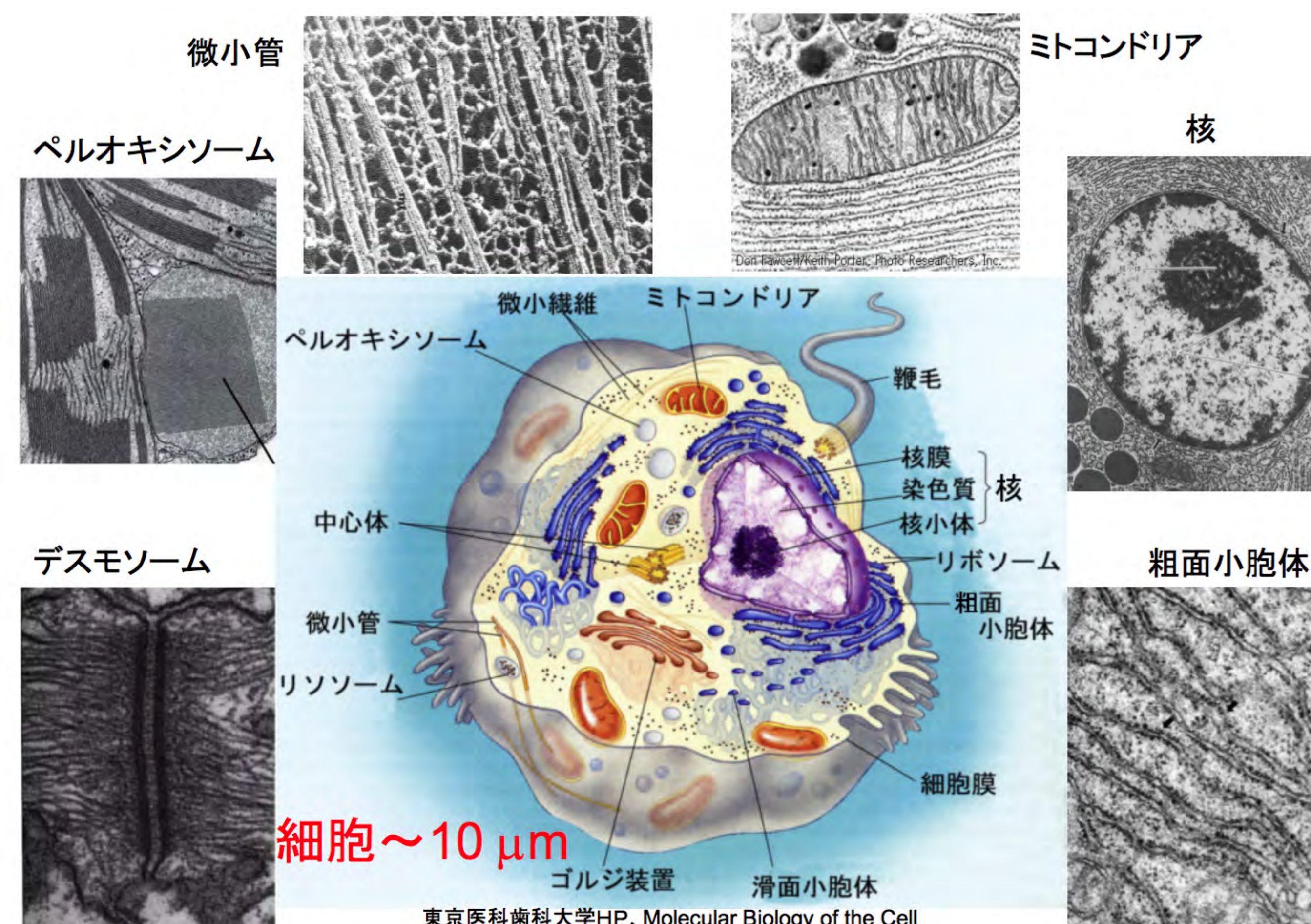
有機伝導体κ-(ET)2Xにおける光応答。光励起による電子分極の生成直後に何が起きているのか？ 励起状態から相転移へとどうつながるのか？ ERLによって，不均一性やダイナミクスに関する研究が進むことが期待される。

時間分解 XAFS による触媒反応の研究 (立命館大学 稲田康宏先生)



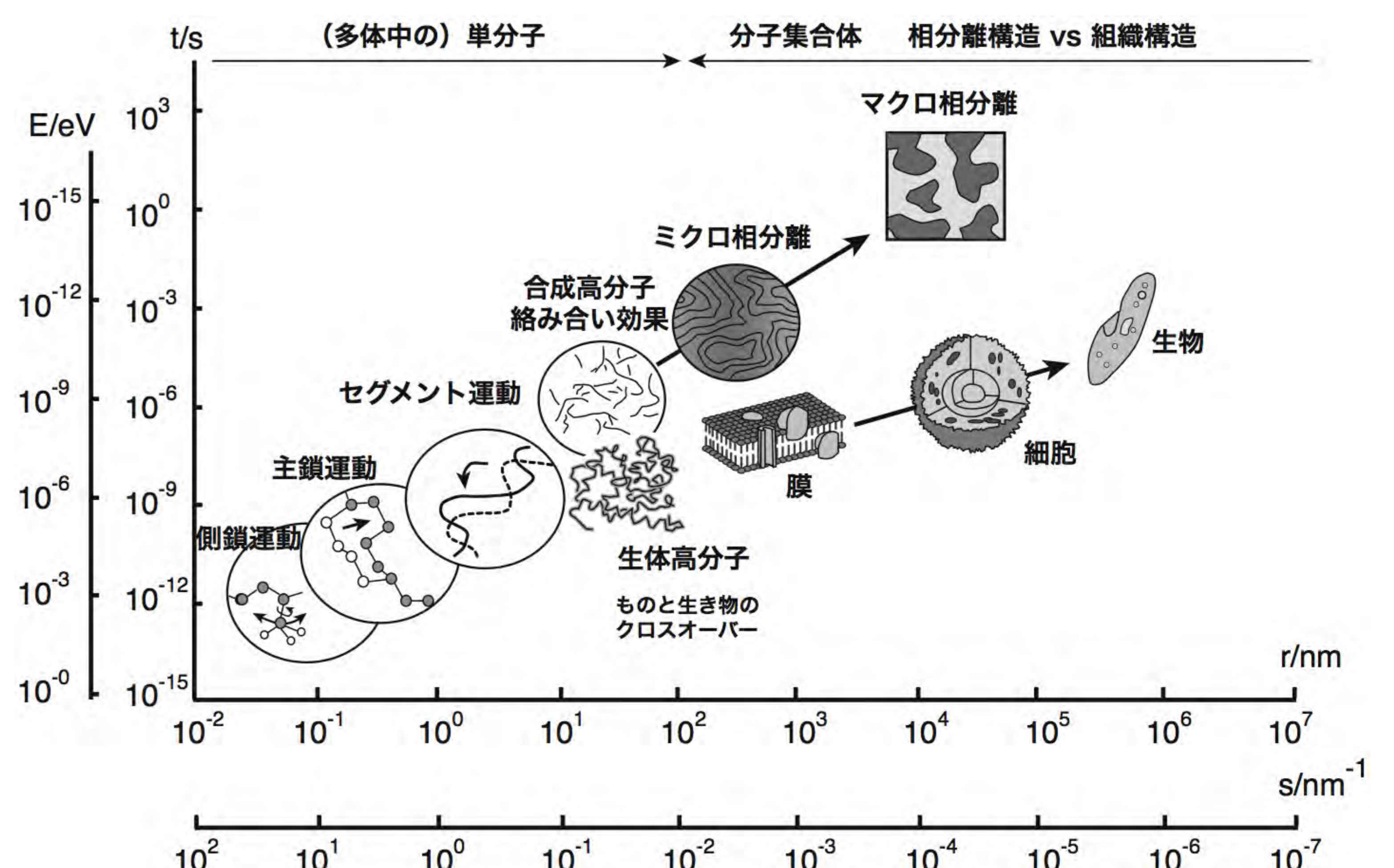
光触媒反応のダイナミクスの例。光励起直後に生成した状態から準安定化した状態が特異な化学反応を引き起こしている場合が多く，準安定状態の構造や電子状態の解明は極めて重要である。また，その前に生成する不安定励起状態は準安定状態の生成効率を支配するため，その状態解析には ERL から得られる 100fs 程度のパルス X 線による時間分解 XAFS 測定が必要不可欠である。

細胞内空間階層構造のコヒーレントイメージング (慶応大学 中迫雅由先生)



生命現象を理解するためには，タンパク質など個々の生体分子に注目しながらも，細胞や構造体全体を見渡す研究が必要である。巨大分子複合体，細胞内小器官や細胞自身のように，結晶化が不可能な生体非晶物体の立体構造のナノメートル分解能での可視化には大きな期待が寄せられる。

ソフトマターの時空間階層構造 (東京大学 篠原佑也先生)



高分子・液晶・ナノコンポジットなどのソフトマターは，ナノメートルからミリメートルまで幅広い構造の階層性を有し，各階層の力学的特性・ダイナミクスを反映して，複雑な巨視的力学物性を示す。ERLによって，ソフトマターの広い時空間階層構造を総合的に捉えることが可能になると期待される。