

# 産業プラントと社会インフラにおける高経年化マネジメント II コンクリート構造物検査への可搬型 950keV 高エネルギーXバンドライナックX線源の適用

三菱化学(株) 三浦 到 東京大学 上坂 充 (株)アキュセラ 草野 譲一  
(株)日立パワーソリューションズ 服部 行也 (株)関東技研 小野 洋伸

## On-site Nondestructive Inspection of RC using a Portable 950 keV X-Band Linac X-ray System

Mitsubishi Chemical Co. Itaru MIURA  
The University of Tokyo Mitsuru UESAKA  
Accuthera Inc. Jyoichi KUSANO  
Hitachi Power Solutions Co., Ltd. Yukiya HATTORI  
Kanto Giken Co., Ltd. Hironobu ONO

**キーワード** 非破壊検査, 工業用X線装置, コンクリート, コンクリート構造

### 1. はじめに

社会インフラ, 産業インフラの経年化対応は, 今や社会トレンドと言っても良い。橋梁等に代表される社会インフラは, 1970年代の高度成長期にその多くが建設された。一般に構造物の寿命は概ね50年とされているため, 2020年前後に一挙に社会インフラ老朽化が顕在化する。社会インフラの維持管理・更新等のコストは約4兆円/年に達しているが, 図1に示したように今後約20年間で2倍近くに達するとの予測もある。一方, 産業インフラは, 経済基盤となる発電所・製油所・ガス貯蔵施設・製鉄所・化学工場などのコンビナートがその代表的な設備であり, 主に民間事業者により維持管理されているが, 国の経済基盤を支える重要設備であることから社会インフラ同様に公共性が高い。図2に示したように, 産業イン

フラ設備は, 社会インフラが建設された1970年代の高度成長期に建設されたが, 1970年代以前の1950年~1960年代に建設されたものもあり, それらは既に建設後50年を経過している。

### 2. Xバンドライナック高エネルギーX線源の開発

社会インフラ, 産業インフラ検査対象物は図3のように大型構造物である。現行の検査は, 主に構造物表面や表層部の検査を行っているが, 内部状況把握のニーズが高まっている。内部状態の把握手段として高エネルギーX線技術が有効であるが, 図4のように現存の装置では規模が大きく現場利用困難の状況である。結果として出力300keV程度での撮像に留まっている。本稿では, Xバンドライナック技術を使用した可搬型950keV高エネルギーX線源開発の概要と撮像能力の一端として鉄筋コンクリート構造物への適用結果を述べる。

可搬型X線源の開発は, 現在のトレンドを先取りする形で2006年度に可搬化の要となるXバンド直線加速器の開発を皮切りに本格的な開発を開始し図5に示した経過で現在も進行中である。開発は最高出力950keVと3.95MeVの2種である。現行法規下で, 社会インフラ, 産業インフラの両方で合理的に現場展開が可能な950keVの開発を先行し, 現場で実設備を対象にした試験運用の段階に到達している。さらに, 心臓部であるXバンドライナック技術は, 図6に示した6MeV医療用サイバーナイフにも活用されている。

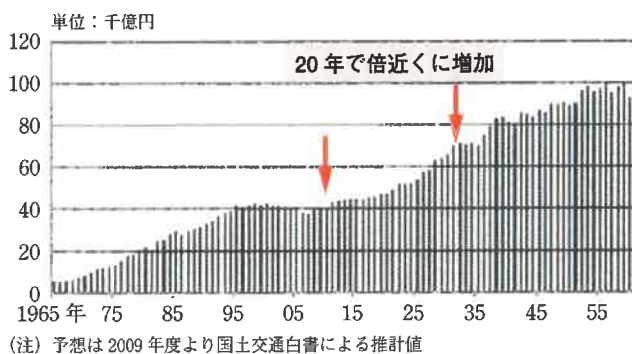


図1 社会インフラ維持管理費の推移<sup>1)</sup>

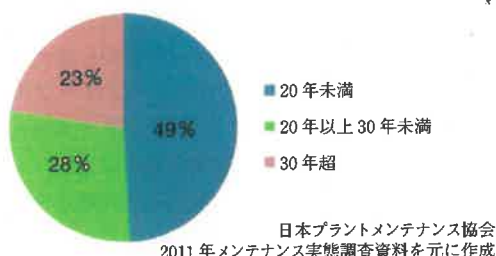


図2 産業インフラの供用年数<sup>2)</sup>



図3 産業インフラ, 社会インフラ設備

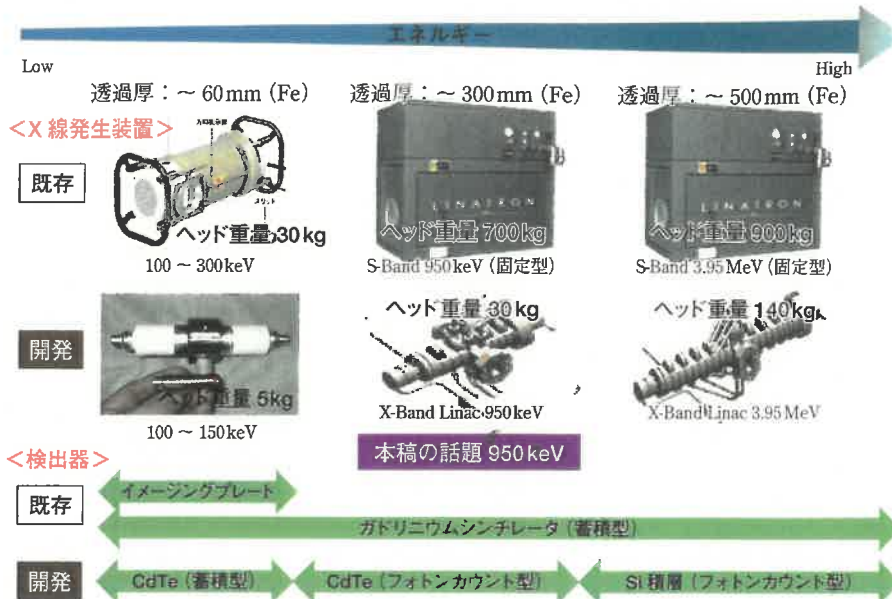


図4 工業用X線システムの現状と開発

2006年度～2007年度：950keV Xバンド加速器開発  
 地域新生コンソーシアム研究開発事業（関東経済産業局）

（2008年度～：医療用6MeV加速器開発（NEDO））

2010年度～2011年度：950keV, 3.95MeV システム試作  
 地域産学官共同研究拠点整備事業（科学技術振興機構）

2012年度～2014年度：950keV 実用機試作・実機適用  
 JST 復興促進プログラム（科学技術振興機構）

2013年度～2014年度：950keV, 3.95MeV 適用性検証  
 道路橋等の点検効率化への計測・NDI技術検証（国土交通省）



図5 XバンドライナックX線源開発経緯

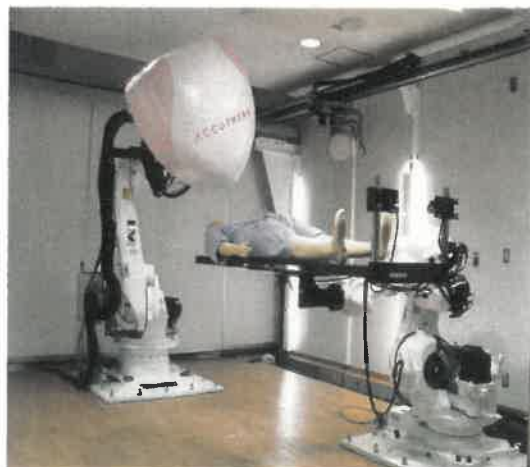


図6 Xバンドライナック6MeV搭載サイバーナイフ

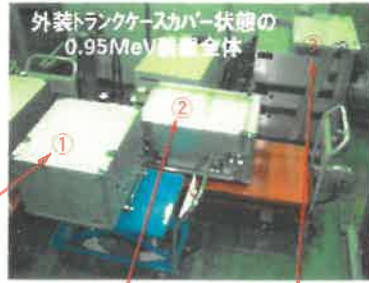
### 3. 950keV 高エネルギーX線システム開発

#### 3.1 研究試作機の概要

2010年度地域産学官共同研究拠点整備事業（科学技術振興機構）での研究試作機の概要を述べる。図7に試作機を示した。システムは3点の装置構成になっており、現場への搬入組み立てによる運用が出来るものである。装置構成の内、X線発生部と9.3GHz高周波源部は検査対象物の直近へ配置し、電源・冷却水・制御ユニットはそれらから少し離れた位置に配置する。システムのコントロールはさらにケーブル長30m離れた位置でタブレットによりX線ON-OFFやエネルギー調整などを行う。また、万一の場合の緊急停止は、タブレットにて行う。同等出力の既存X線装置と比較し大幅な小型化と軽量化が出来ており現場利用が現実的となった。また、兄弟機である3.95MeVについても図8に示したように、同様な構成としている。

システムコンセプト

- 小型軽量化, 装置ユニット化, 可搬性
- ・小型でも必要十分な X線強度
- ・機能別にユニット分割
- ① X線発生部 (44kg)
- ② 9.3GHz 高周波源部 (50kg)
- ③ 電源・冷却水・制御ユニット (110kg)
- 総重量 204kg



① X線発生部



② 9.3GHz 高周波源部



③ 電源・冷却水・制御ユニット

図7 Xバンド 950keV 研究試作機<sup>3)</sup>

試作したシステムの心臓部である X線発生部の構成図を図9に示した。超小型電子銃から発射した電子は 9.3GHz Xバンド超小型電子ビーム加速管で加速されターゲットに衝突し

X線を発生する。Xバンド加速管は既存システムのSバンド(2.8GHz)と比較し小型化の目玉でもある。また、加速エネルギー源には低パワーのマグネトロン(別置きの9.3GHz高周波源部)を採用し電源部や冷却装置など周辺機材の小型化にも貢献した。マグネトロンとX線発生部を繋ぐマイクロ波導波管はフレキシブルタイプを開発しX線照射方向への自由度も確保している。さらに、高エネルギーがゆえ対応が必要となるヘッド部からの漏洩X線についてもタングステン合金製遮蔽体にて対応し図10に示す通り、その効果を発揮した。



図8 Xバンド 3.95MeV 研究試作機<sup>3)</sup>

3.2 研究試作機による鉄筋コンクリート撮像試験

最近話題の社会インフラの代表格の鉄筋コンクリート構造物を対象とした撮像試験を行った。この種の案件では橋梁検査に限り4MeV未満の高エネルギーX線システムの使用場所一時変更届出制度が可能になっている事から兄弟機となるXバンドライナック3.95MeV実用化開発が並行して進んでいる。しかし、民間施設の場合、現行法規では1MeV未満の運用が現実的であり950keVシステムが必要になる。

装置の小型化・軽量化

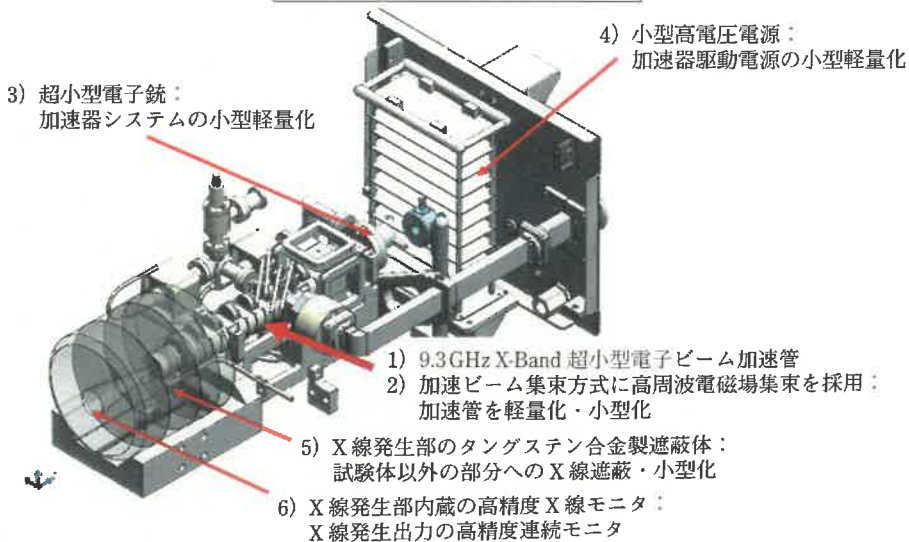


図9 X線発生部構造<sup>3)</sup>



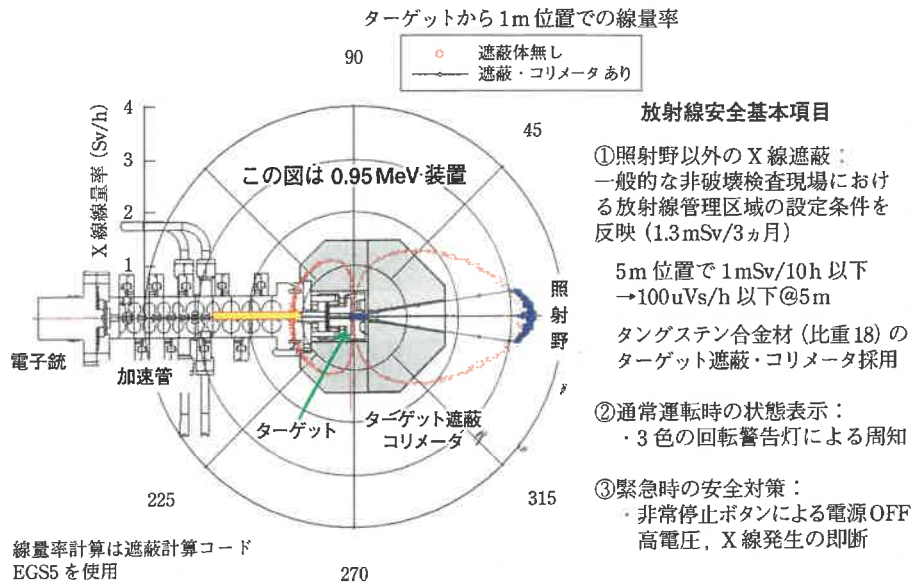


図 11 に (独) 土木研究所所有の実橋梁サンプルを示す。梁幅は 600mm ~ 1000mm 級で、強度評価には梁内部の鉄筋の状態 (残存径) 把握が重要になる。民間施設の場合も鉄筋コンクリート架構や埠頭等、ほぼ同様の構造である。図 12 に試験撮像の構図と結果を示した。950keV 線源とイメージングプレート検出器の組み合わせにおいて、コンクリート厚さ 400mm であれば約 15min の撮像時間で鉄筋の外縁シルエットを撮像できる事が確認できた。撮像時間 15min 程度であれば、民間の工場敷地内での立ち入り禁止等の安全管理面から実用レベルと判断される。

### 3.3 実用機の開発

研究試作機による試験撮像 (現場運用試験も含む) を経て、2012 年度から JST 復興促進プログラムにて 950keV 実用機の開発を行った。実用機は、現場での可搬性やフレキシブルなセッティングへの対応などを重視し 2013 年末に完成し、2014 年 1 月実物の鉄筋コンクリート構造物の試験運用を行った。



図 11 実橋梁サンプル

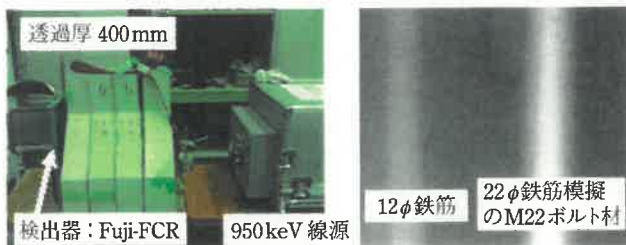


図 12 鉄筋コンクリート試験撮像<sup>4)</sup>

## 4. 鉄筋コンクリート構造物実機への 950keV 試験運用

試験運用対象設備は図 13 に示す民間の埠頭設備で、幅 600mm の鉄筋コンクリート梁である。図 14 のように、一部の梁は表層コンクリートのはく離や割れが認められていた。主鉄筋は図 15 に示したように上下に計 12 本の配置となっている。試験運用受け入れ先では、先行して梁の強度解析を行い (図 16) 当該梁の場合、耐荷重の要は梁長手方向中央下部の主鉄筋である事と下部主鉄筋 6 本の総断面積が当初の総断面積から 30% 以上減少している場合、強度補強が必要との結果を得ていた。すなわち、鉄筋コンクリート梁の強度評価上、主鉄筋の残存断面積を把握する事は極めて重要という事である。

試験運用の対象梁は、表層コンクリートの割れが発生している梁 3 本である。埠頭床下に仮設吊足場を設置し、X線診



図 13 試験運用対象の民間埠頭設備<sup>4)</sup>

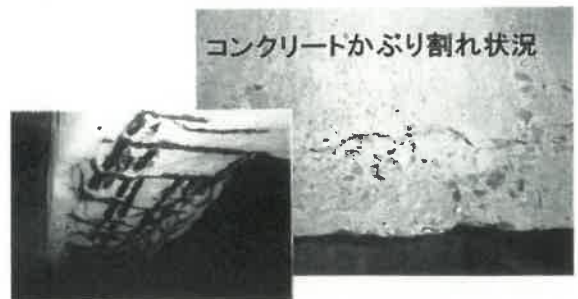


図 14 鉄筋コンクリート梁の状況<sup>4)</sup>

断システムを図 17 のように展開した。実用機は、一般的な仮設足場上で展開可能な重量としている。また、駆動電力は調達容易な 10kVA エンジン発電機でまかなえる設計になっている。機材の運搬面でもワンボックス車 1 台（防振床構造車）で運搬可能な規模である。超精密品の加速器システムを搭載し、これまで約 3500km の車両運搬実績がある。

撮像は図 17 に示すように梁下から斜め上方に向け X 線を照射し、下部主鉄筋 3 本を一度に撮像する方法で行った。検出器はイメージングプレートを使用した。露出時間は約 10 分で、管理区域は線源中心から半径 12m である。実用上支障の無い範囲と考える。撮像した X 線像の代表例を図 18 に示す。散乱線の影響を大

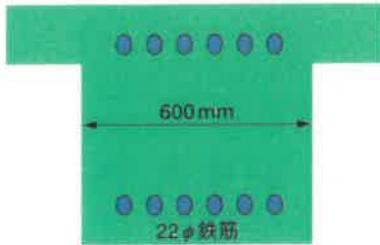


図 15 鉄筋コンクリート梁断面概要<sup>4)</sup>

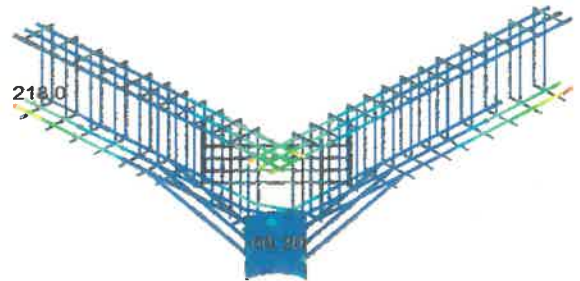


図 16 鉄筋コンクリート梁の強度評価<sup>4)</sup>

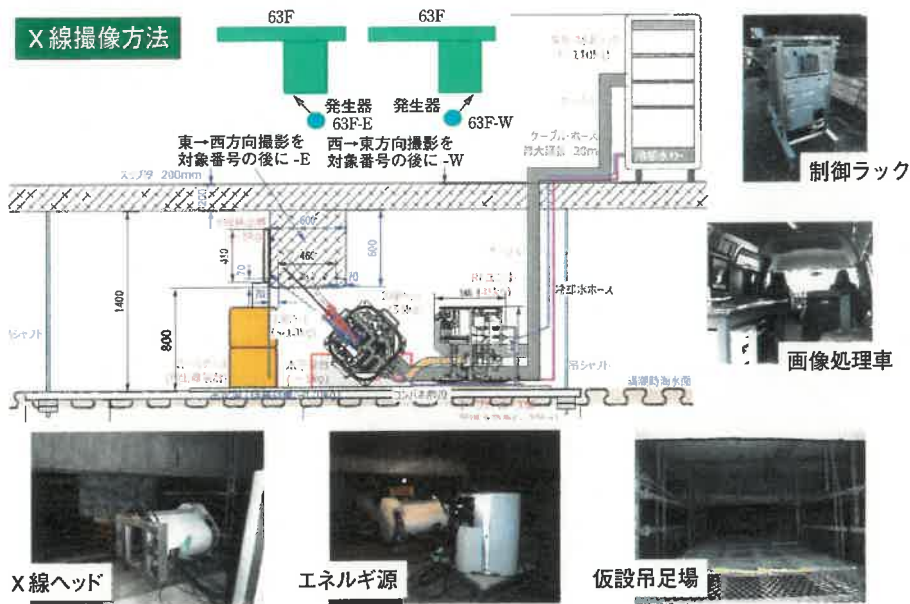


図 17 仮設吊足場上に展開した 950keV システム<sup>4)</sup>

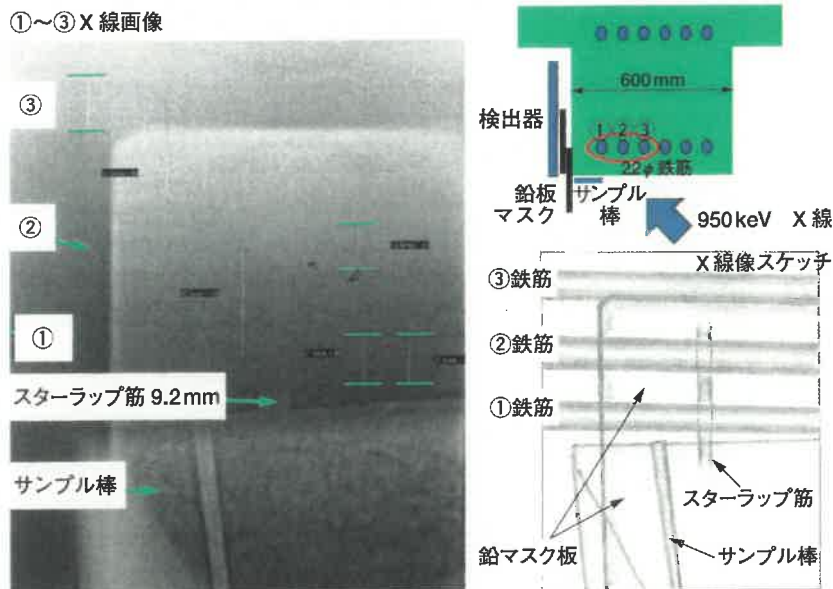


図 18 鉄筋撮像代表例

きく受けた為、鉛板のマスクを設置し撮像した画像であるが、3本の主鉄筋の外径シルエットを捉えている。同画像から画像拡大率を考慮し、主鉄筋残存径を求め、残存総断面積による評価を行った結果、主鉄筋の最大腐食減肉量は6.3mm、総断面積の減少率は最大で14.5%であった。強度解析による強度補強が必要となる総断面積減少率30%に到達していないとの結果である。試験撮像受け入れ先からは、大規模な強度補強が必要か否か悩んでいた本案件にインパクトがある定量的な情報が得られたと好評であった。

## 5. おわりに

- ・鉄筋コンクリート梁の強度評価上重要な主鉄筋残存径の撮像に成功した。Xバンド950keV高エネルギーX線システムの現場での本格運用の国内初事例は成功し、好評であった。
- ・現場運用にかかる運搬、現地組み立て、管理区域設定、露出時間、運用に大きな問題は無く、ほぼ実用レベルに到達した。
- ・撮像時の散乱X線対策が必要である事が判明。現在、散乱線のエネルギー帯域（低エネルギー帯域）の感度を落とした半導体検出器やフィルタリングが可能な半導体検出器の開発

を行っている。

Xバンド950keV可搬型X線システム開発と撮像能力の一端を紹介した。開発は終盤段階に入り、魅力的なシステムに仕上がりがつつあると感じている。今後も実用機開発に注力する所存である。また、兄弟機である3.95MeVシステムの橋梁検査向け実用化開発も本格化しており、将来の産業プラント設備への利用にかかる法整備も含め開発を加速する所存である。開発過程では、(独)土木研究所や石油化学会社、大型鋼製品メーカーなど多くの方から意見をいただき、ここまで到達した。誌面を借り御礼申し上げる。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：平成21年度国土交通白書
- 2) 日本プラントメンテナンス協会：2011年メンテナンス実態調査，(2011)
- 3) 三浦，上坂，草野，服部，小野：現場用可搬型Xバンドライナック950keV高エネルギーX線技術の開発と撮像能力，日本設備管理学会，平成25年秋季研究発表大会，(2013)
- 4) 三浦，上坂，草野，服部，小野：950keV高エネルギーXバンドライナックX線源によるコンクリート構造物試撮結果，日本設備管理学会，平成26年春季研究発表大会，(2014)



三浦 到 三菱化学(株)(314-0102茨城県神栖市東和田17-1) 設備技術部 SSMTグループ  
1987年三菱化学(株)入社，石油化学プラントの検査技術検討に携わる。現在は、各種検査技術開発に従事  
URL：<http://www.m-kagaku.co.jp/kashima/index.html>



上坂 充 国立大学法人東京大学(319-1188茨城県那珂郡東海村白方白根2-22) 大学院工学系研究科原子力専攻 教授  
1985年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。1986年石川島播磨重工業に入社。1992年東京大学工学部附属原子力工学研究施設助教授に就任。1999年より現職。先進加速器に関する研究に従事  
URL：<http://www.nuclear.jp/~kiki/>



草野 謙一 (株)アキュセラ(319-1188茨城県那珂郡東海村白方白根2-22) 技術開発事業部  
1966年日本原子力研究所入所，原子力施設・加速器装置の建設・運転に携わる。2008年(株)エーイーティーに入社・(株)アキュセラに出向，小型加速器応用のX線装置開発に従事  
URL：<http://www.accuthera.com/>  
<http://www.aetjapan.com/>



服部 行也 (株)日立パワーソリューションズ(317-0073日立市幸町三丁目2番2号) 研究開発センタ  
昭和57年3月 東京都立大学理学研究科博士課程修了  
昭和59年4月 (株)日立製作所 入所  
昭和59年5月 理学博士  
～昭和61年6月 東京大学原子核研究所受託研究員  
平成19年10月 (株)日立エンジニアリング・アンド・サービス転属，核融合(ITER)・加速器(HIMAC)の設計開発，産業用高エネルギーX線CT装置(動燃大洗)の設計開発，非破壊検査装置(中性子水分計)の開発等に従事  
平成24年12月～ シニア社員  
URL：[www.hitachi-power-solutions.com](http://www.hitachi-power-solutions.com)



小野 洋伸 (株)関東技研(319-1112茨城県那珂郡東海村村松405) 代表取締役  
1976年(昭和51年)10月，関東技研工業所入社。1981年(昭和56年)11月，事業を継承し，事業主となる。1984年(昭和59年)4月，(株)関東技研を設立，代表取締役に就任。2004年から，筑波大学産学リエゾン共同研究センター客員研究員とし，医療用放射線遮蔽装置の開発にあたる  
URL：<http://www.kantogiken.co.jp/>