

放射線による社会インフラ・産業プラントの健全性評価

乾電池でも駆動可能な省電力X線管を用いた
小型軽量X線検査装置とその適用例

つくばテクノロジー(株) 齊藤 典生 王 波 王 晓東
鈴木 修一 劉 小軍

Compact X-Ray Inspection System using a Power Saving X-Ray Tube which can be Driven by Dry Batteries and its Application

Tsukuba Technology Co., Ltd. Norio SAITO, Bo WANG, Xiao-Dong WANG
Shuichi SUZUKI and Xiaojun LIU

キーワード 非破壊検査、放射線透過試験、可搬式X線発生装置、画像処理、腐食、経年変化

1. はじめに

X線検査装置は、その対象物として鉄、アルミ、ステンレスなどの金属から樹脂、セラミックなど各種素材に対して、工業製品、材料、食品、電子部品、建造物などの非破壊での欠陥検査、異物検査、構造検査、安全検査などに欠かせないものになっている。X線管の管電圧は20~450kV程度と幅広く、国内外でいろいろな方式に基づいて開発・実用化が進められている。

既存のX線管はその原理上、フィラメントの予熱が必要であり、その電圧・電流を連続して印加すると電源が大きくなり、質量が重くなるものが多い。また、X線管を駆動するのにエージングが必要で、使いたい時にすぐ使うことができない。従って、現場などにX線装置を持ち込んで検査を行う場合、持ち込むのに時間や手間がかかったり、電源の確保が大変だったり、エージングが終わるまで待ったりすることになる。

我々は、産業技術総合研究所の技術移転ベンチャとして、乾電池でも駆動可能な省電力X線管を用いた小型軽量X線検査装置を開発し、電線、配管、コンクリート、有機材料等の各種非破壊検査に適用を行っている。ここでは、その乾電池でも駆動可能な省電力X線管およびそれを用いた小型軽量X線検査装置の電線検査への適用例について紹介する。

2. 乾電池でも駆動可能な省電力X線管

我々の開発した小型軽量X線検査装置に採用されている省電力X線管の針葉樹型カーボンナノ構造体冷陰極電子源¹⁾の拡大写真を図1に示す。

この写真のように針葉樹型カーボンナノ構造体冷陰極電子源の先端は、基板側に向かうほど太くなっていて、電界の力に対する耐性が強くなっている。そのため、一般のX線管で使用されている熱陰極電子源のヒータやフィラメントより長寿命という特長がある。この針葉樹型カーボンナノ構造体冷陰極電子源を搭載した省電力X線管を図2に示す。

この図2の省電力X線管は単3乾電池2本分ぐらいの長さであり、図1の針葉樹型カーボンナノ構造体冷陰極電子源の先端から、電界放出現象によって多数の電子が放出される。図1からわかるようにこのX線管にはヒータやフィラメントがなく、予熱やエージングが不要であり、乾電池を電源とし

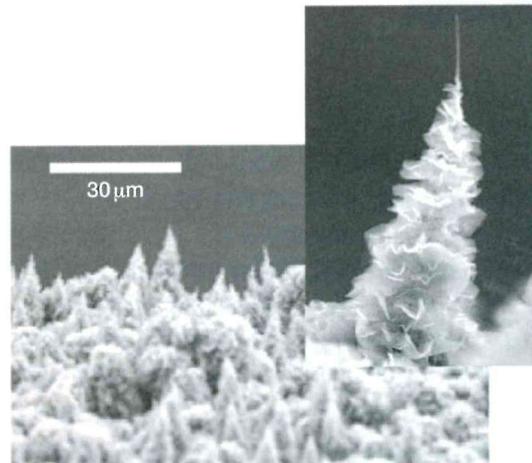


図1 針葉樹型カーボンナノ構造体冷陰極電子源



図2 針葉樹型カーボンナノ構造体冷陰極電子源を搭載した省電力X線管

て必要なときにすぐX線を出力できる。しかも、X線の発生時にしか電力を消費しないので、単3乾電池1本でも駆動できるほどの省電力X線管である。

表1に熱陰極式X線管との比較を示す。

3. 乾電池駆動省電力小型X線発生装置の性能

3.1 乾電池駆動省電力小型X線発生装置

上記の省電力X線管を搭載し、実用化した手のひらサイズの乾電池駆動小型X線発生装置を図3に示す。この装置は

表 1 热陰極式 X 線管と冷陰極式 X 線管の比較

熱陰極式 X 線管	冷陰極式 X 線管
<ul style="list-style-type: none"> ・ フィラメントからの熱電子放出型 ・ フィラメントの加熱と待機の電力が必要 ・ フィラメントの温度が一定になるまで待つ必要あり ・ イニシャルのみならずランニングコストも高い ・ 電源部を含めると大型で質量が重く取り扱いに不便 ・ フィラメントも寿命の一因となり、交換・メンテナンス等にコストがかかり、煩雑 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 冷陰極式カーボンナノ構造体の電界放出型 ・ フィラメントの加熱と予熱・待機電力が不要 ・ パルス動作が可能で X 線管の即時起動が可能 ・ 乾電池でも動作可能でランニングコストが安価 ・ X 線発生装置全体の小型軽量化が可能 ・ 針葉樹型カーボンナノ構造体により 1000 万ショットの長寿命

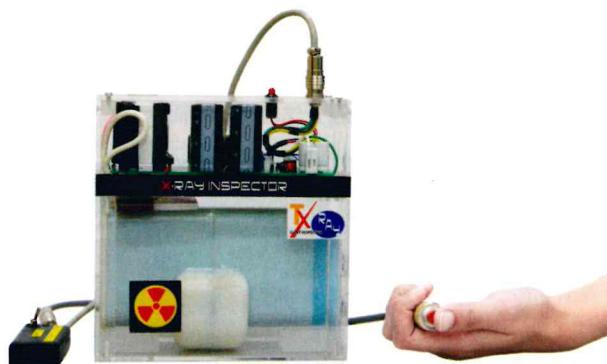


図 3 手のひらサイズの乾電池駆動省電力小型 X 線発生装置

新たに開発した独自の昇圧回路により単3乾電池1本の電圧(1.5V)を何段にも昇圧し、4万倍の管電圧60kVまで昇圧できる。これによって、厚さ70mm以下、本体質量1.85kg、単3乾電池1本で、最高エネルギー60keVのX線を出力することができる。この省電力小型X線発生装置の仕様を表2に示す。

本装置は、小型軽量ながら単3乾電池1本で1ショット50msのパルスX線を約100ショット照射することができる。また、実際に非破壊検査装置として使用する場合は、小型のリチウムイオンバッテリ7.2Vを2個搭載し、昇圧倍数を最適化し、照射可能パルス数を5000ショット程度としている。

X線の実効焦点サイズは1mmとなっており、一般的な可搬型X線発生装置に使用されている実効焦点サイズが3mm程度の熱フィラメント型X線管より小さく、被検査体との距離を短くして撮像してもより高精細な画像を得られる。

3.2 本装置の性能

本装置とフラットパネル検出器(FPD)を組み合わせて、カ

表 2 乾電池駆動省電力小型 X 線発生装置の仕様

項目	仕様値	備考
管電圧	60kV	
管電流	2mA	
パルス幅	50ms	
X 線管	冷陰極式	針葉樹型カーボンナノ構造体冷陰極電子源
X 線管寿命	1000 万ショット	
実効焦点サイズ	1mm	
本体サイズ	W170 × H178 × D68mm	
本体質量	1.85kg	
遮蔽ボックスサイズ	W189 × H198 × D86mm	鉛遮蔽付き
遮蔽ボックス質量	3.0kg	
電源	単3乾電池 1本	約 100 ショット 照射可能
動作温度	0 ~ 40°C	

ドリーダを被検査体として、透過検査を試みた。

図4のように、X線照射室の中で本装置とFPDを対向させて、その間に被検査体であるカードリーダーを置いて、X線照射室の外側からリモートスイッチによりX線を発生させ、60kV、50ms、1パルスのX線を照射して、透過画像を撮像した。

使用したFPDの仕様を表3に示す。

このFPDは検出エリアが10.2×15.3cmで、三菱化学製のシンチレータをCMOSイメージセンサに直接接合している。それゆえ、3000:1という広いダイナミックレンジを有している。

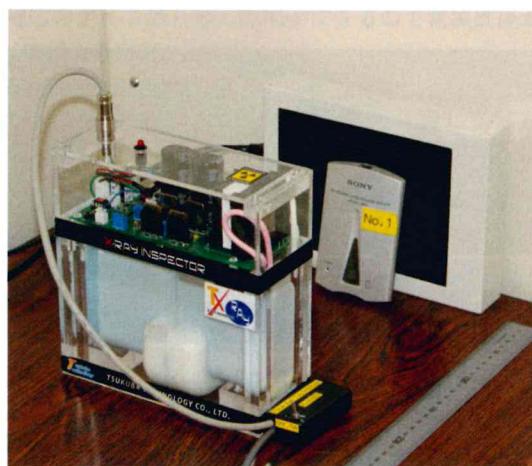


図4 本X線発生装置とFPDによる撮像状況

表3 フラットパネル検出器(Teledyne Rad-icon Imaging社, Shad-o-Box 1548 HS)の仕様

項目	仕様(値)
撮像素子	CMOS イメージセンサ
シンチレータ	Gd ₂ O ₃ S
検出エリア	10.2 × 15.3 cm
画素数	1032 × 1548
画素ピッチ	99 μm
フレームレート	20fps
質量	約 3.5kg

また、本装置はX線管からの利用しないX線を遮蔽するため、図5のようなX線発生装置本体を鉛で遮蔽したボックスに入れることができる。そして、直接線と散乱線を遮蔽するためにX線照射ボックスなどの遮蔽設備の中で撮影する。

図6に本装置とFPDで撮像したカードリーダの透過画像を示す。

このFPDは、画素ピッチ99μm、画素数1032×1548のCMOSイメージセンサを用いており、被検査体を高精細に撮像するには十分な性能である。実際、図6のように本装置による透過画像は単3乾電池1本で駆動しているにもかかわらず、被検査体のカードリーダの内部基板やコネクタの様子が高精細に撮像されていて、良好な画像が得られた。

現在のX線による非破壊検査に使用される一般的なX線発生装置は、比較的大型で質量が重く、また、AC電源やエンジニアリングが必要であり、検査開始までに手間や時間がかかるのが通例である。また、イメージングプレートを使用した非破壊検査の場合は、撮影したイメージングプレートの透過画像をスキャナで読み出す行程を必要とし、その透過画像を見るまで手間や時間を要している。

これらに対して、本装置は、乾電池駆動省電力X線管を採用しているので、予熱が不要で、乾電池でも使いたい時にすぐ照射でき、小型ながら60kVというX線を長寿命で発生することができる。さらに、FPDと組み合わせれば、被検査体のX線透過画像を高精細に画像表示することができ、画面上で瞬時に被検査体を非破壊検査することができる。

このように省電力X線管を搭載した手のひらサイズの乾電池駆動小型X線発生装置は小型ながら60kVのX線を出力でき、移動とハンドリングが容易であり、機動性のあるX線発生装置としての性能を備えている。



図5 本X線発生装置の遮蔽ボックス

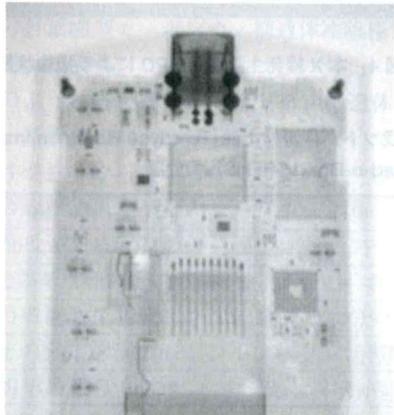


図6 本X線発生装置とFPDによる透過画像

4. 本装置の電線検査への適用例

4.1 電線検査の現状と課題

2020年東京オリンピック開催が決まり、政府をあげて社会インフラ、産業インフラの保全が急務の課題となっている。そういうインフラ設備の中で、電力を供給する電線設備およびその検査はあまり注目されていないが、水、食料品の次に重要なインフラである。

そのため、電力会社の直長8万kmにもおよぶ送電線の検査に関して、導体として硬銅撲線を使用した絶縁電線において、応力腐食断線を原因とした停電事故を起こす危険があるため、40年前から様々な取り組みが行われてきた。

しかし、これまで送電線の有効な検査手段はなく、高圧送電線の検査方法としては、主に電線にリングを取り付け、検査員が電線に宙吊りになり、電線を目視で検査する方法が行われている。この方法は高所作業で危険が伴い、かつ停電させなければならず、安全で効率的に検査するのは難しいという課題がある。

そこで、基本的な保全方法として送電線全線を張り替える工事が計画されている。ただし、この全線を新線に張り替える工事は、まだ使用できる健全な電線まで廃棄される可能性があり、工事および材料も多額のコストが発生するので、適切な検査手法が求められている。そこで、我々はこの問題を解決するため、上述した、省電力X線管を搭載した乾電池駆動小型X線発生装置とFPDを組み合わせた新型の電線用小型X線検査装置を開発し、実用化を進めている。

4.2 新型の電線用小型X線検査装置

乾電池駆動可能な省電力X線管を搭載した新型の電線用小型X線検査装置を図7に、本装置の仕様を表4にそれぞれ示す。



図7 新型の電線用小型X線検査装置

表4 新型の電線用小型X線検査装置の仕様

項目	仕様値	備考
管電圧	70 ~ 120kV	
管電流	最大 2mA	
パルス幅	20 ~ 100ms	
X線管	冷陰極式 針葉樹型カーボンナノ構造体冷陰極電子源	
X線管寿命	1000万ショット	
実効焦点サイズ	1mm	
筐体サイズ	W270 × D270 × H 180 mm	
筐体質量	20kg	
電源	リチウムイオンバッテリ	約5000ショット 照射可能
外部漏えい線量率	0.6μSv/h以下	X線作業主任者資格不要
動作温度	0 ~ 40°C	

本装置は、先に紹介した60kV出力の小型X線発生装置より管電圧を上げて電線検査に必要な70～120kVを得られるようにX線管および昇圧回路を改良した。

本装置は、X線検査装置部と操作＆画像表示PCからなり、前者は小型X線発生装置とFPDから構成されている。実際の検査の際は、図8に示すようにX線検査装置部の小型X線発生装置とFPDとの間に被検査体である電線を置いて蓋を閉め、電線を挟んだ状態で固定して検査する。



図8 X線検査装置部

本装置には、旧型のX線検査装置²⁾になかった機能として、X線検査装置部にそれ単体で管電圧70～120kV、パルス幅20～100ms、パルス数1～100パルスという撮像条件の設定ができるよう制御パネルが付いている。もちろん、これらの設定は操作＆画像表示PCで行うこともできる。実際の検査の際には、PC画面上の操作でX線の照射をスタートし、電線を透過した透過画像をFPDで検出し、その信号をPCにLANケーブルで転送して、電線検査ソフトを用いて、透過画像をPC画面上に表示する。

X線検査装置部はX線の外部漏えい線量率を0.6μSv/h以下に抑えるよう筐体に鉛遮蔽を施しており、X線作業主任者資格なしで、事務所等でも電線検査が可能になっている。この装置なら小型軽量で移動しやすく、装置を現場に持ち込んで「安全」に「容易」に電線を検査することができる。

4.3 電線検査画像

本装置を表3に示したFPDと組み合わせて、管電圧100kV、50ms、1パルスのX線を照射し、送電線を撮像した画像を図9に示す。

この送電線は図10のような構造になっており、図9の透過画像では銅芯線とアルミ撲り線の状態を良好に撮像できている。電線検査ソフトは、各種の画像処理を施し、画面上でリ



図9 電線検査ソフトによる表示画像

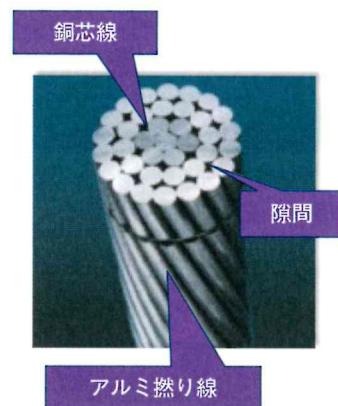


図10 送電線の断面

アルタイムに拡大・縮小、ヒストグラム表示、明るさ・コントラスト等の調整が可能で、使い易いものになっている。

本装置のFPDは、デジタル出力であり、撮像結果を瞬時に表示することができ、容易に撮像条件を変えて、何度も電線を撮り直して検査することができる。従って、最適な撮像条件で被検査体である電線を検査することができ、欠陥部位の特定、腐食度合いの定量化などに効果を發揮する。また、このFPDの検出エリアは10.2×15.3cm、画素ピッチは99μmであり、これは送電線の太さが3～4cm程度であるのに対して、その検査装置として実用範囲であるといえる。

4.4 電線検査への適用

ここで、電線検査の手法を解説する。

電線の腐食は図11のように電線に雨や雪が降り、電線内部の隙間に水分が入り込み、長い時間が経過するとアルミ撲り線の腐食により腐食生成物が発生し隙間ができる。また、腐食周辺のアルミ撲り線に隙間ができるので電線直径が1～2mm膨張する現象が起こる。

この腐食による隙間と直径の膨張をX線による非破壊検査で検出することができれば、電線の腐食の部位と度合を検査できることになる。

この知見をもとに本装置で送電線サンプルの腐食部に管電圧100kV、50ms、1パルスのX線を照射し、撮像した画像を図12に示す。

図12の画像から送電線の腐食部ではその直径が太くなっていることがわかる。さらに、このX線透過画像の健全部と腐食部の輝度プロファイルを作成し、それらを図13のように重

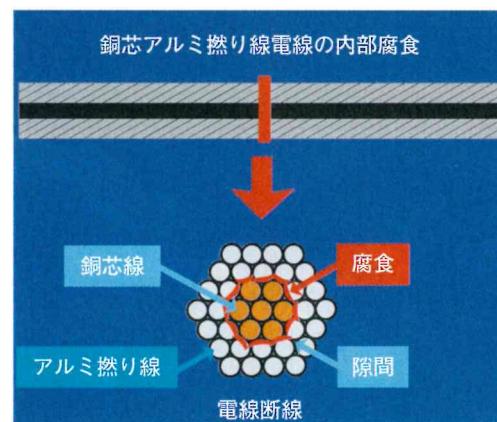
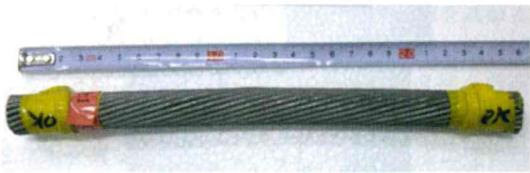
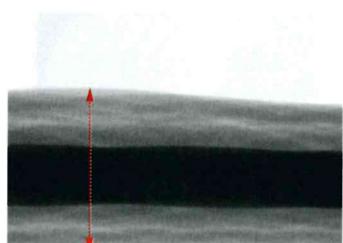


図11 電線の腐食



送電線サンプル



電線腐食部（直径が大きい）

図 12 電線腐食部のX線透過画像

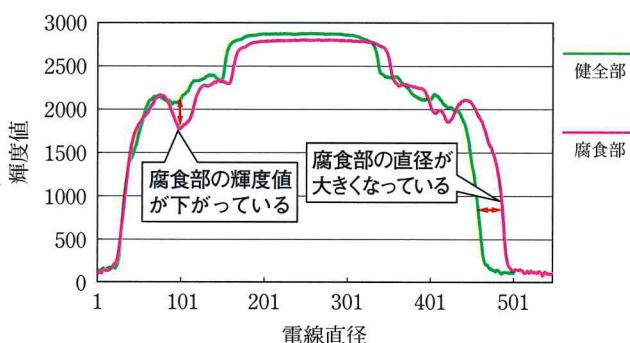


図 13 電線の透過画像における輝度プロファイル

ねて比較すると、腐食した部分の輝度値が下がり、また直径が大きくなっていることがわかる。これらによって電線の腐食の有無を判別でき、本装置の電線検査への有用性を実証することができたと考える。

さらに我々は関東経済産業局のプロジェクトで図 14 のイメージのような送電線欠陥検出用小型自走式X線検査装置の開発に着手した。

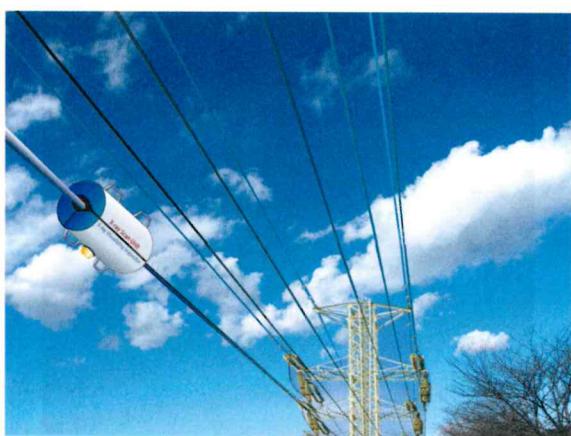


図 14 送電線欠陥検出用小型自走式X線検査装置

この自走式電線検査装置が完成すると、送電線の自動検査が可能となり、電力インフラの保全に大きく貢献できることが期待される。

5. おわりに

乾電池でも駆動可能な省電力X線管を用いた小型軽量X線検査装置はその省電力X線管のゆえ、小型、軽量で、すぐX線を発生でき、乾電池でも駆動可能なほど省電力で、かつ長寿命という特長を持つ。それゆえ、可搬型の非破壊X線検査装置として、電線検査以外にも配管、その他各種検査への適用が期待できる³⁾。

この装置は今までのX線検査装置の概念を打ち破り、乾電池でも最高エネルギー60～120keVのX線を発生することができ、今までX線検査ができなかった狭い所、高い所、電源がない所などでの非破壊検査を可能にする⁴⁾。この装置なら現場で機動性を発揮したX線非破壊検査が可能になり、その適用範囲が広がる。特に災害地や緊急を要する現場等で、すぐX線検査を行いたい時に効果を発揮する。

謝辞

本開発にあたり、(独)産業技術総合研究所 鈴木良一首席研究員に多大なるご協力をいただき、ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 鈴木良一：乾電池駆動可搬型高エネルギーX線装置の開発，*Synthesiology*, 2(3), pp.237-243, (2009)
- 2) 齊藤典生, 王 曉東, 松岡一夫, 王 波：単3乾電池駆動X線装置による電線用小型X線検査装置, 映像情報インダストリアル, 第2号, pp.41-46, (2014)
- 3) 齊藤典生, 松岡一夫, 王 波：現場用リアルタイムX線検査装置の開発, 検査技術, 19(1), pp.70-73, (2014)
- 4) 齊藤典生, 王 波, 王 曉東, 安達健太郎, 于 大選：単3乾電池駆動小型X線装置の実用化, 映像情報インダストリアル, 第2号, pp.13-17, (2015)



齊藤 典生 つくばテクノロジー(株)

(305-0047茨城県つくば市千現1-14-11)

研究開発部 X線事業課 課長

1985年山形大学大学院修士修了, 国立公害研究所にてレーザレーダーの研究に従事。その後、日本電気(株)にて高出力YAGレーザの開発などレーザおよび検出装置の開発に従事。2012年より産総研技術移転ベンチャーであるつくばテクノロジー(株)にてX線非破壊検査装置、レーザ超音波可視化検査装置の研究・開発に従事

URL : <http://www.tsukubatech.co.jp/>



王 波 つくばテクノロジー（株）
(305-0047 茨城県つくば市千現 1-14-11)
代表取締役社長
1986 年（中国）西安電子科技大学修士修了、
助手、講師として、レーダーシステムおよび
信号処理を研究。1993 年筑波大学に留学、
CT と MRI の画像処理研究、1999 年から通
信総合研究所と（独）産業技術総合研究所
にて、3D 画像処理と非破壊検査技術に関する
研究。2005 年つくばテクノロジー（株）
を設立し、レーザ超音波可視化などの検査
装置の開発・製品化に従事



王 晓東 つくばテクノロジー（株）
(305-0047 茨城県つくば市千現 1-14-11)
研究開発部 ソフトウェア事業課 課長
東京大学電子工学博士の学位取得後、旭化
成（株）情報技術研究所にて 5 年にわたり
パターン認識と信号処理技術に関する研究
開発を行い、2013 年より産総研技術移転ペ
ンチャーであるつくばテクノロジー（株）
にて X 線非破壊検査装置およびレーザ超音
波可視化検査装置の開発・製品化に従事



鈴木 修一 つくばテクノロジー（株）
(305-0047 茨城県つくば市千現 1-14-11)
執行役員 製造部 部長
計測機器メーカの計測開発部に 20 年間勤務。
計測機器のハードウェアおよびソフトウェア
開発業務に従事。2012 年より産総研技術移
転ベンチャーであるつくばテクノロジー（株）
にてレーザ超音波可視化検査装置の製品化に
従事



劉 小軍 つくばテクノロジー（株）
(305-0047 茨城県つくば市千現 1-14-11)
取締役 CFO
1992 年中国より来日留学、1999 年筑波大
学社会工学研究科博士号取得、物材機構
(NIMS) と産総研 (AIST) にて 14 年間数理
計算、数値シミュレーションに関する研究
に従事。2008 年以降、当会社にてレーザ超
音波可視化検査装置のソフトウェア開発に
従事