

平成 28 年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「電線欠陥検出用小型自走式 X 線検査装置の開発」

研究開発成果等報告書

平成 29 年 3 月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 株式会社つくば研究支援センター

(目 次)

第1章 研究開発の概要	- 3 -
1-1 研究開発の背景	- 3 -
1-2 研究目的及び目標	- 4 -
1-3 研究体制	- 5 -
1-3-1 研究組織（全体）	- 5 -
1-3-2 管理体制	- 6 -
1-3-3 管理員及び研究員	- 7 -
1-4 成果概要	- 8 -
1-5 当該研究開発の連絡窓口	- 8 -
第2章 本論	- 9 -
【1. 予熱不要省エネルギーX線管の開発】	- 9 -
【1-1】省電力小型冷陰極X線管の開発	- 9 -
【1-2】高電圧発生回路の開発	- 11 -
【1-3】高安定X線パルス制御回路の開発	- 13 -
【2. 高速3方向検査技術の開発】	- 16 -
【2-1】X線源と検出器の三方向高速同期撮像の開発	- 16 -
【2-2】自走式ガイドローラの開発	- 21 -
【2-3】電線欠陥検出ソフトウェアの開発	- 22 -
【3. 小型安全な検査装置の開発】	- 26 -
【3-1】1時間当たり0.6 μ Sv以下の遮蔽材の設計	- 26 -
【3-2】軽量化筐体の製作	- 27 -
最終章 全体総括	- 32 -
複数年の研究開発成果	- 32 -
研究開発後の課題	- 33 -
研究開発後の事業化展開	- 33 -

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景

現在、電線腐食検査を安全にかつ効果的に検出手法が確立されていないのが実情であり、電力会社では停電事故を起こすリスクを回避するため、敷設後 30 年以上経過した電線を順次、新線に張り替えている。このような電線を機械的に新品に張り替える工事は、健全で充分使用可能なものまで廃棄処分される事になり、工事作業コストやエコロジーの観点からも、不経済であり、適切な方策とは言えず、大きな問題になっている。

そこで、X 線装置による検査が試みられているが、従来の X 線源はヒーターを使用して電子を陰極から放出し陽極ターゲットに入射させて X 線を出す方式が使われているため陰極が約 1000 度近くになるまでの起動時間を要し X 線を発生していない時にもヒーターに電力供給が必要なため消費電力が大きい。また、長時間の通電によるヒーター・フィラメントの劣化が問題である。そのため大容量のバッテリーを要して構造上筐体フレームも縦横 1m 以上あり、重量も鉛の遮蔽がない状態でも 55kg 以上もあって、電線検査をするには高所作業を強いられる現場サイドにおいては非常に危険な作業と言わざるを得ない。また X 線は直線方向に照射されるため、被検体に向け下方から空中に露出したまま放出され X 線出力も高出力なため、危険が伴うと言わざるを得ない。

本開発では、上述した問題を高度化して解決するため、送電線を端から端まで装置を移動しながら、電線を 1 方向ではなく、3 方向から全周を X 線透過撮影し、可視化検査する装置とし、本体重量はできる限り軽量化して、専門家でなくても腐食部位を容易に発見し、検査時に電線より 10m 離れた場所で安全を確保し、小型で設置がしやすく、その場で「簡単」に欠陥検査できる小型 X 線検査装置を開発する。

送電線点検は熟達した技術力が必要で、地上高 50 メートル以上もある危険な作業



1-2 研究目的及び目標

本事業では、従来の技術における電線検査装置の課題を解決すべく高度化目標は以下になる。

- 1) 予熱不要で省エネルギーである冷陰極タイプのX線管を開発製作する。
- 2) 3方向のX線撮影を行い欠陥検出の精度を上げる。
- 3) X線遮蔽があり自走式小型軽量筐体を製作する。

従来技術

課題

- ①予熱必要で大エネルギーのX線管
- ②電線の移動が遅く、1方向の検査で欠陥を見逃す
- ③装置が大きく、重く、設置が大掛かりで、X線遮蔽がなく安全でない

新技術

特徴

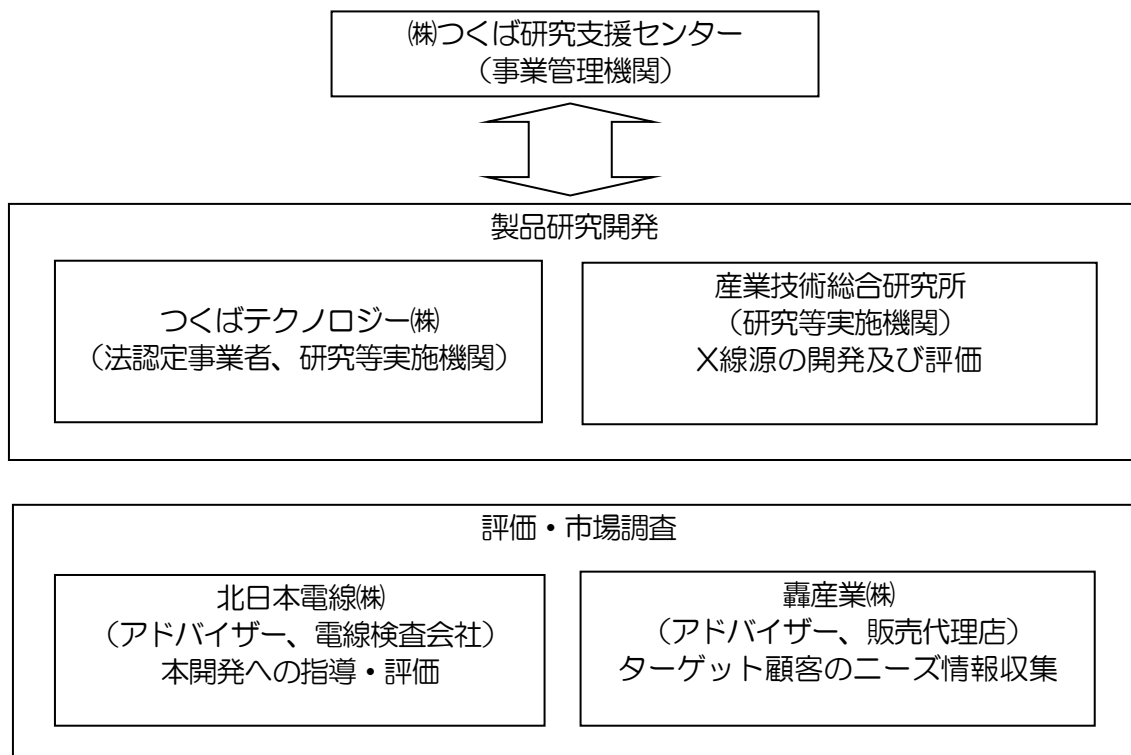
- ①予熱不要で省エネルギーのX線管
- ②電線の移動が速く、3方向の検査で欠陥を見逃さない
- ③装置が小さく、軽く、設置が簡単で、X線遮蔽があり安全

本事業における、技術的目標値は下記のとおりである。

項目	数値目標
管電圧	70～100kV
ピーク管電流	10mA
パルス幅	5ms～10ms
検査速度	10cm/s 以上
装置重量	20kg 以下
装置外側で 10m 離れて漏えいX線量	1.3mSv/3 ヶ月以下

1-3 研究体制

1-3-1 研究組織（全体）



総括研究代表者（PL）：

つくばテクノロジー株式会社 代表取締役 王 波

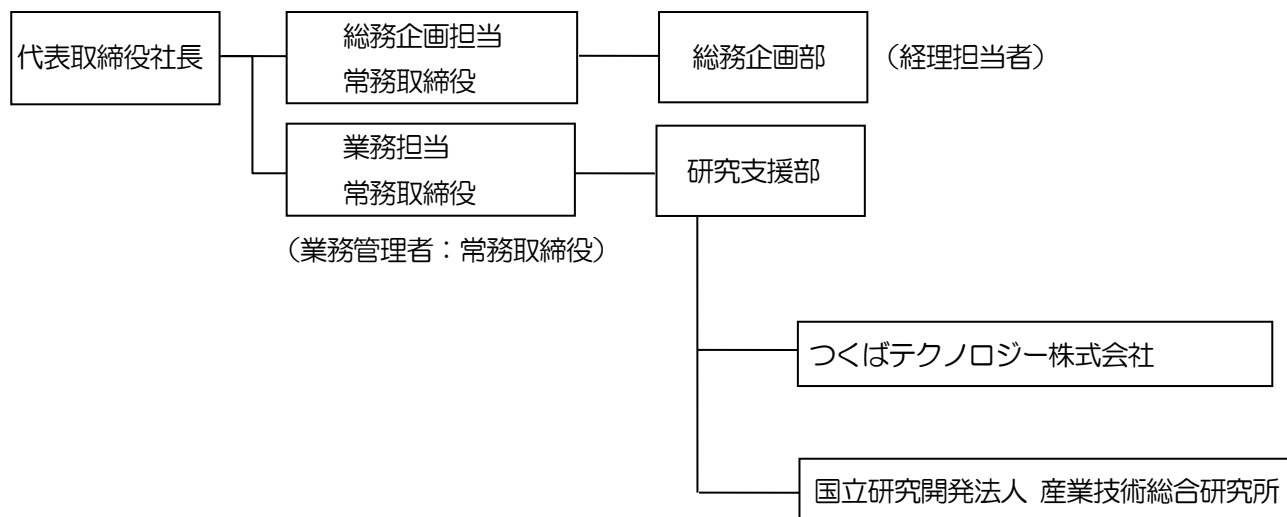
副総括研究代表者（SL）：

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 首席研究員 鈴木 良一

1-3-2 管理体制

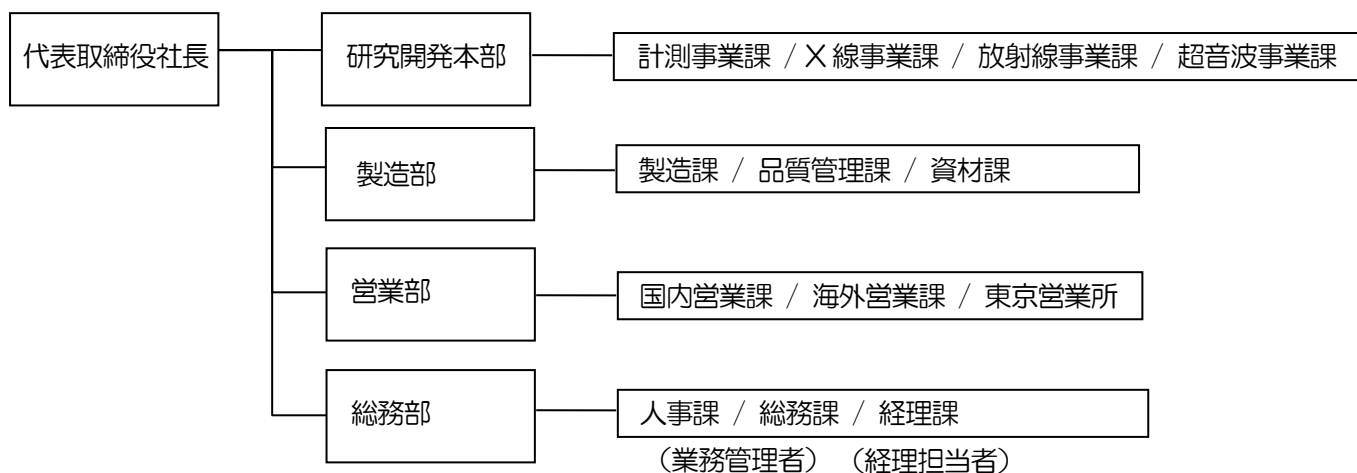
<事業管理機関>

[株式会社つくば研究支援センター]

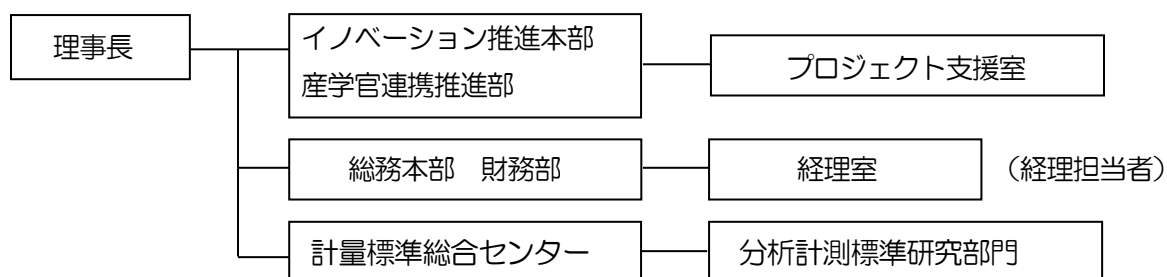


<研究開発機関>

[つくばテクノロジー株式会社]



[国立研究開発法人 産業技術総合研究所]



1-3-3 管理員及び研究員

(管理員)

【事業管理機関】 株式会社つくば研究支援センター

氏名	所属・役職
高田 青史	研究支援部 次長
早瀬 昌輝	研究支援部
五井 博	研究支援部

【研究開発機関】 つくばテクノロジー株式会社

氏名	所属・役職
楊 姍姍	総務部 課長
草野 淳	総務部

(研究員)

【研究開発機関】 つくばテクノロジー株式会社

氏名	所属・役職
王 波	代表取締役社長
高坪 純治	取締役ＣＴＯ
劉 小軍	取締役ＣＯＯ
梶 克廣	社長補佐 研究員
松岡 一夫	製造部 研究員
于 大選	研究開発部 研究員
鈴木 修一	製造部 部長
王 曉東	研究開発部 課長
趙 顕雄	研究開発部 研究員
松田 英明	製造部 課長
董 居忠	研究開発部 研究員
吉本 弘正	研究開発部 研究員
安達 健太郎	製造部 係長
齊藤 典生	研究開発部 課長
後藤 善之	研究開発部 研究員
和田 賢士	研究開発部 研究員
重松 邦昭	研究開発部 研究員
大熊 誠二	製造部 研究員

【研究開発機関】 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

氏名	所属・役職
鈴木 良一	分析計測標準研究部門 首席研究員

1-4 成果概要

【1-1】省電力小型冷陰極 X 線管の開発

⇒ 管電圧向上：100～130kV を実現、小型化（従来の 1/2 サイズ）を実現、放電対策は完了

【1-2】高電圧発生回路の開発

⇒ 130kV 出力基板完成、放電対策は完了

【1-3】高安定 X 線パルス制御回路の開発

⇒ PWM 制御電源基板完成、放電対策は完了

【2-1】X 線源と検出器の三方向高速同期撮像の開発

⇒ X 線管 3 管照射と検出器のサンプリング周波数を調整し転送スピード改善したことで X 線撮影を 1 秒以内での処理を実現した。

【2-2】自走式ガイドローラの開発

⇒ ガイドローラ部に十分な出力を有するモーター及び強度が高い機械部品からなる自走機構を開発した。自走速度 10cm/s での駆動を実現し、5cm/s で安定して自走することを確認した。

引き続き動作試験を行い、駆動部の耐久性を確認する

【2-3】電線欠陥検出ソフトウェアの開発

⇒ 3 方向から撮像した検出画像に画像処理（フィルタリング）を行い電線の欠陥、腐食による太さの増加を自動検出できるソフトを開発した。

【3-1】1 時間当たり 0.6 μ Sv 以下の遮蔽材の設計

⇒ X 線管と検出器の配置を考慮して、最小限の遮蔽材で効率的に遮蔽することを実現した。

装置外で 10m 離れて漏えい X 線量 1.3mSv/3 ヶ月以下の数値目標は達成した。

【3-2】軽量化筐体の製作

⇒ X 線源及び検出部の小型化を行い装置筐体の製作を行った。内部の部品配置配線を考慮し形状の最適化を図ったが、装置の強度を考えると装置全体で 20kg 以下という目標は厳しい状況であり、目標 20kg 以下は未達成であったが、樹脂筐体と軽量化バッテリーを採用すれば重量 20kg 以下も可能である。

1-5 当該研究開発の連絡窓口

（株）つくば研究支援センター 研究支援部 高田 青史

電話：029-858-6061 FAX：029-858-6014

E-mail：tci-is@tsukuba-tci.co.jp

第2章 本論

【1. 予熱不要省エネルギーX線管の開発】

【1-1】省電力小型冷陰極X線管の開発

研究内容

本装置のX線源に採用する冷陰極X線管は小型軽量であり、またX線管自体で放電しにくい以下写真の形状とする。また絶縁のためのモールドもX線管を移動させるので、オイルではなく、固体絶縁樹脂を採用し、これまでの知見をもとに絶縁特性を最適化し、できる限り小型軽量なものとする。これを3方向で使うので、予備も含めて4個製作し、X線源として装置に組み込む。



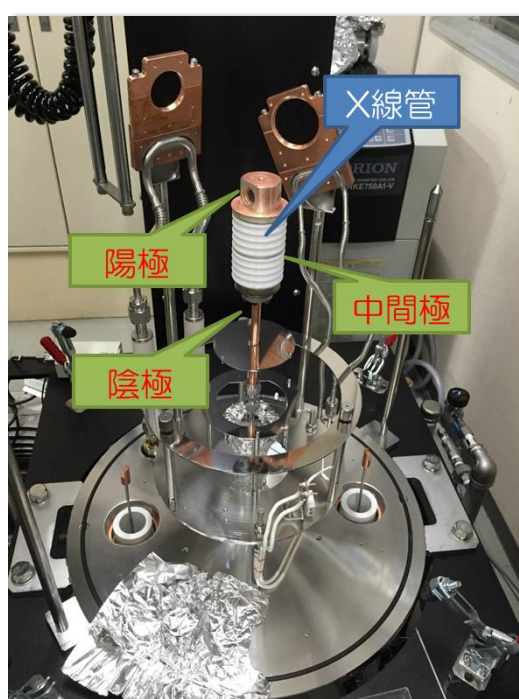
【冷陰極X線管】

成 果

冷陰極X線管の製造工程において安定した性能特性を得るためには、冷陰極に高電圧を印加し続けて電極表面を均一化するエージングが必要であり、更に高真空状態で封止しなければならない。その装置としてX線真空エージング装置を開発製造した。

最初に、この装置を使用してX線管内部を高真空状態にしなければならない。X線管を600℃でベーキング処理をしながら真空引きをすることで内部の不純物（ガス）を取り除き、X線管内部の真空度を8.9E-7Paまで達成することが出来た。

その後、エージング処理にて高電圧を時間（1週間～2週間）をかけて徐々に上げて行き電極表面を均一化することで安定した冷陰極X線管を実現した。

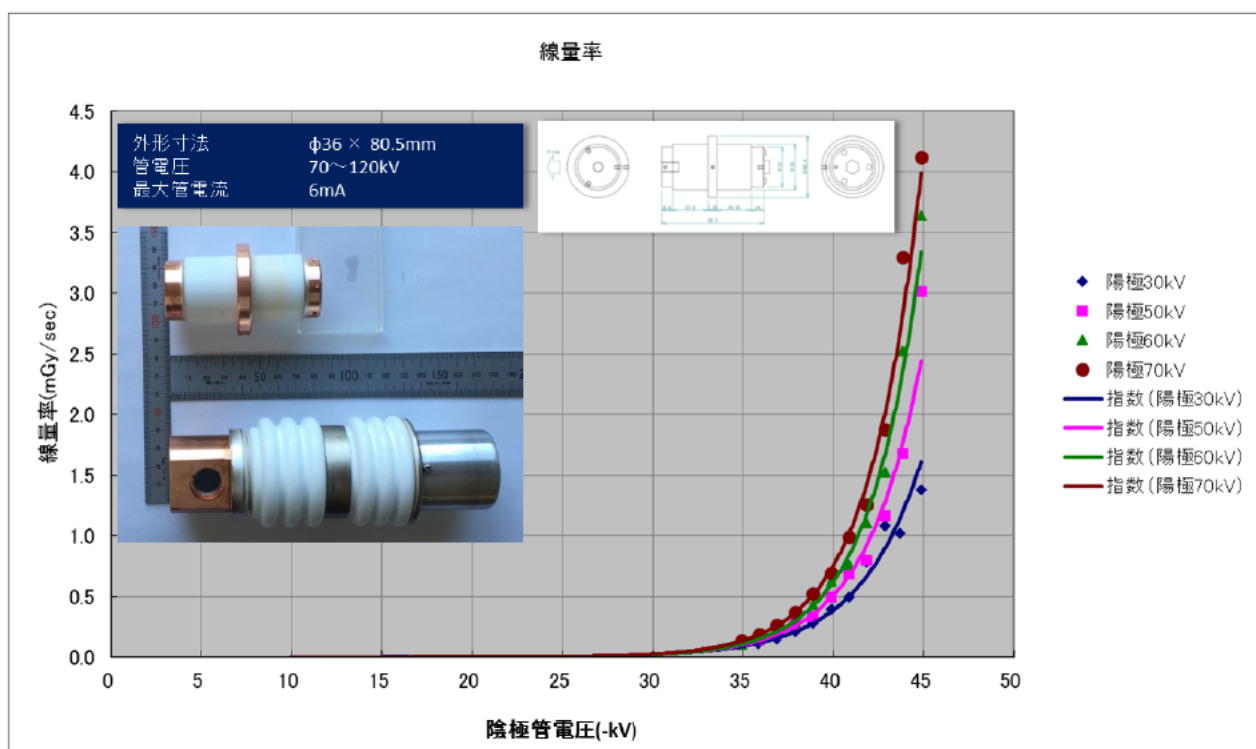


X線管電圧 70～130kV、最大管電流 10mA の目標値を達成し、X線管印加電圧を最大 100kV から 130kV に向上したことで 100kV 出力で特性が安定した X線管を実現できた。

次なる課題である小型化に関しては放電対策として絶縁距離の確保が必要であった。絶縁距離を確保するためには形状が大きくなってしまい相反する。エージング処理を行いながら陽極と陰極に印加する高電圧のバランスを調整し、安定した特性が得られる高電圧の印加条件を決定した。



外形寸法	φ55 × 155mm
管電圧	70～130kV(最大)
最大管電流	10mA

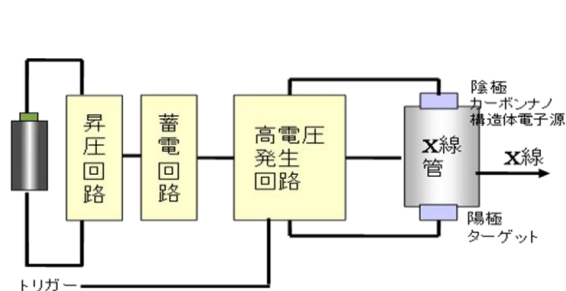


従来 X線管と小型 X線管の比較

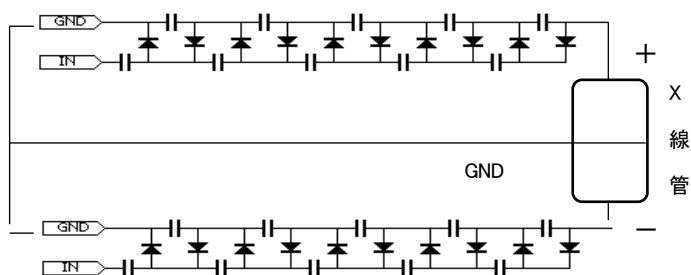
【1－2】高電圧発生回路の開発

研究内容

これまでの開発実績として、可搬型で 100kV 管電圧の開発に成功しており、これを本事業の装置用に最適化して管電圧 70～100kV で小型軽量の X 線源を製作する。冷陰極 X 線管を駆動する高電圧発生回路として、下図左のような X 線管のドライブ回路で、下図右のような陽極側、陰極側の高電圧回路を開発して、X 線管に 70～100kV の管電圧を印加する。



【X 線管ドライブ回路】



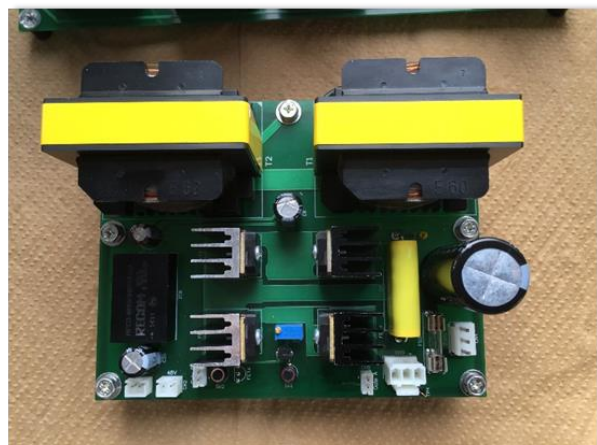
【コッククロフト・ウォルトン回路】

成 果

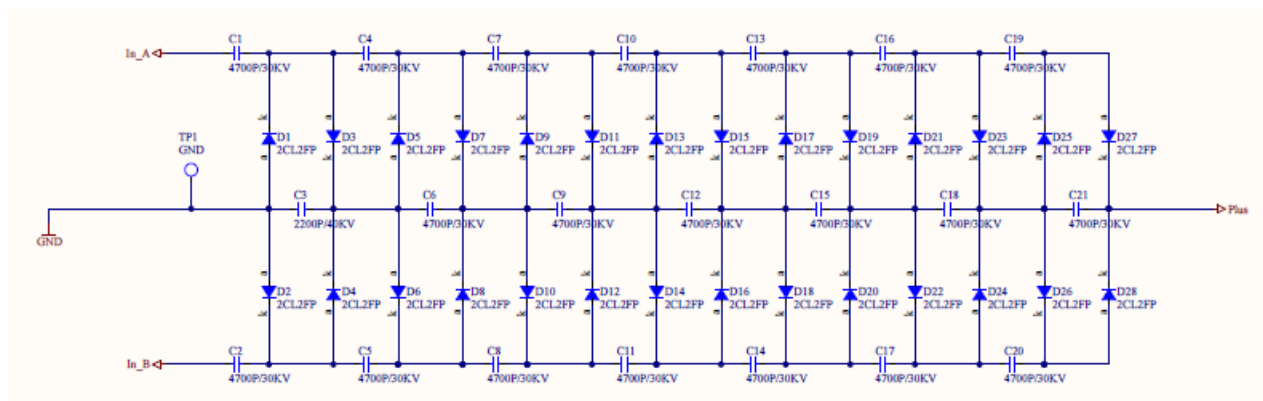
X 線管に印加する高電圧電源は、直接 X 線管に印加する高電圧発生（コッククロフト・ウォルトン）回路が実装されている基板と、それをドライブするドライブ回路基板で構成される。

コッククロフト・ウォルトン回路は、低圧の交流電圧を入力として、高圧の直流電圧を生成する回路である。回路の段数により昇圧率が変わる。入力電圧を低くして後段のコッククロフト・ウォルトン回路の段数を多くするか、または逆にするかで設計仕様が異なって来る。

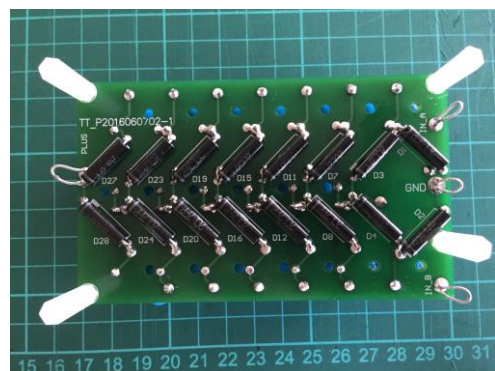
試作したドライブ回路基板にて実験を行いコッククロフト・ウォルトン回路の段数と入力電圧の最適化を行った。最終的に全波整流としたドライブ回路を開発設計しコッククロフト・ウォルトン回路は陽極・陰極共に段数は 7 段とした。



【試作実験用ドライブ回路基板】



【コッククロフト・ウォルトン回路：陽極 7 段】



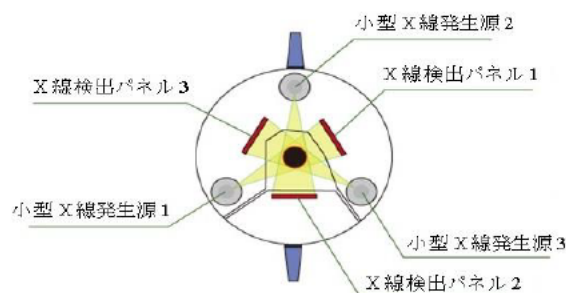
【コッククロフト・ウォルトン回路基板：陽極 7 段】

通常、冷陰極 X 線管は陽極と陰極に高電圧を印加する。3 方向撮影するための X 線管は 3 本使用するため、コッククロフト・ウォルトン回路基板は計 6 枚必要になる。しかしながら 3 本の X 線管を複数同時に照射することがないため、陽極の高電圧部を共用することで 4 枚の基板で構成可能とした。これにて 3 本の X 線管を駆動する高電圧電源（電圧出力 40～60kV（最大）、電流出力 5mA）を実現した。

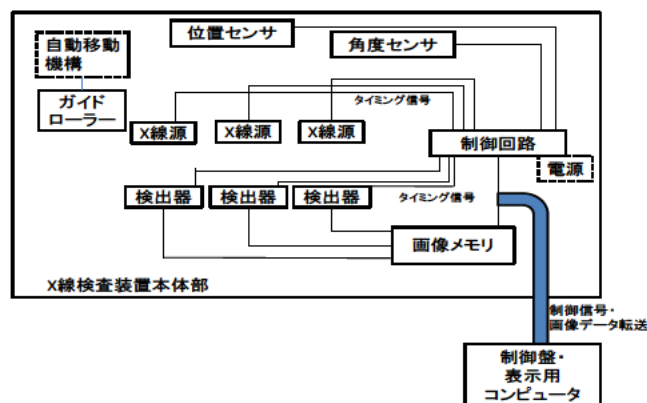
【1－3】高安定X線パルス制御回路の開発

研究内容

本開発の装置では、冷陰極式X線管で安定したX線パルスを発生できるようにX線パルス制御回路のチャージ用コンデンサの容量を最適化し、パルス幅 5ms～10ms の高安定パルス制御回路を開発する。加えて、本開発の装置は3方向からX線を照射し、それぞれ検出器と露光の同期を取りながら電線の透過画像を撮像するよう、3方向を順次制御してX線を発生するパルス制御回路を開発する。



【3方向のX線源と検出器】



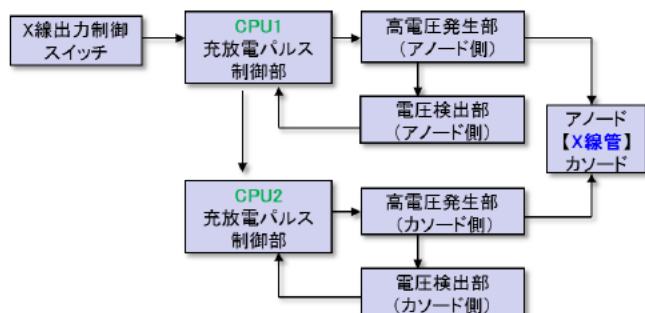
【X線検査装置ブロック図】

成 果

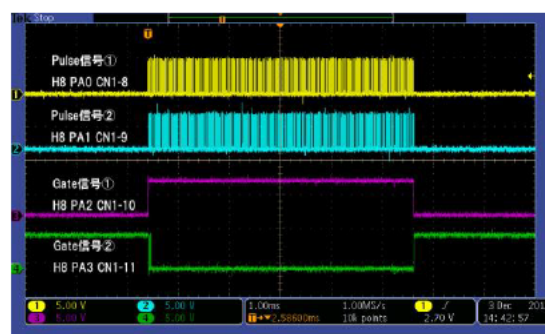
冷陰極X線管に印加する高電圧電源回路をパルス制御する回路として、MPUに搭載されているPWM制御機能を使用する方法（ソフトウェア制御）、FPGAによるPWM制御回路を設計し制御する方法（ハードウェア制御）、PWM専用ICによる制御する方法（ハードウェア制御）がある。各制御方法によるシミュレーション、実証実験を行った。

- MPUに搭載されているPWM制御機能を使用する方法（ソフトウェア制御）

ブロック図をもとにMPU（CPU）を2個使用してMPU内部のPWM制御機能を使い、パルス生成部をプログラムにてパルスを制御できることを確認した。

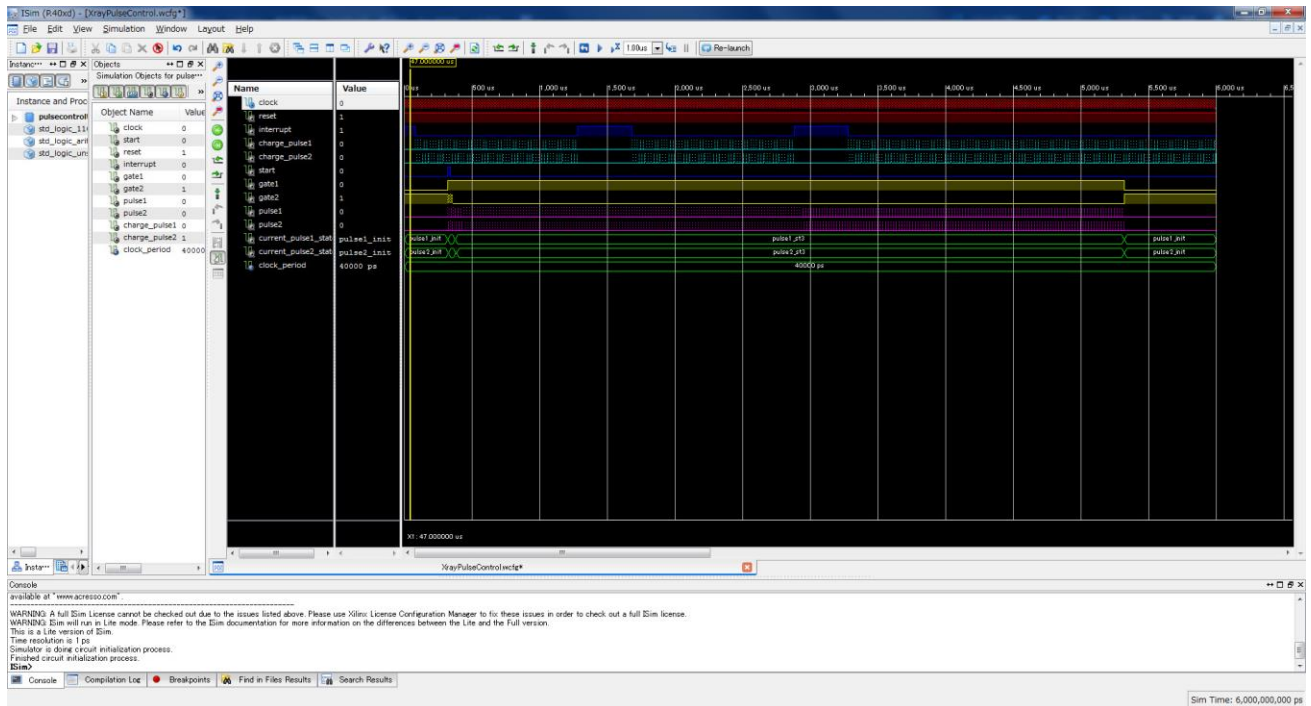


【ブロック図】

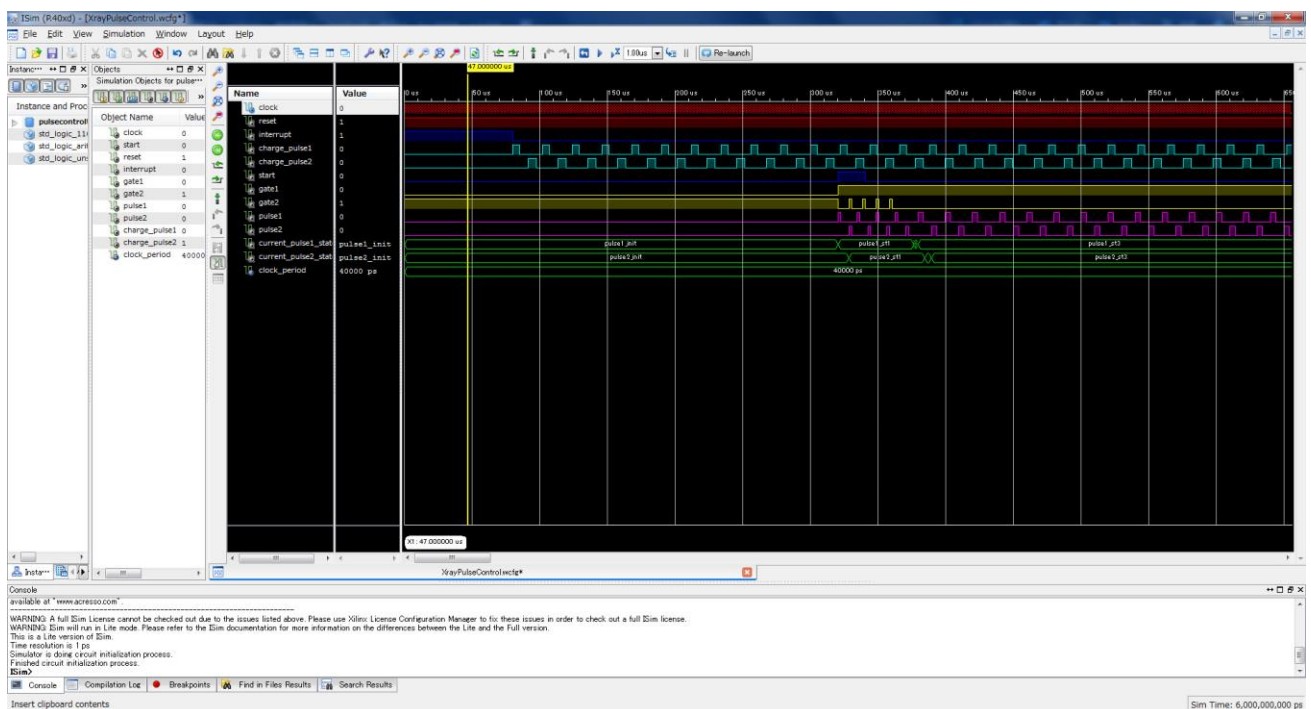


【パルス波形】

- FPGA による PWM 制御回路を設計し制御する方法（ハードウェア制御）
FPGA による PWM 制御回路設計を行い、論理シミュレーションを行った。PWM 制御回路を FPGA に実装してパルスを制御できることを確認した。



【PWM 制御回路シミュレーション】

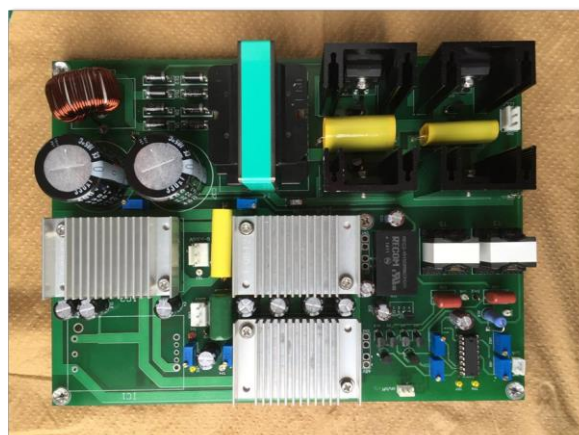


【PWM 制御パルス波形】

- PWM 専用 IC による制御する方法（ハードウェア制御）

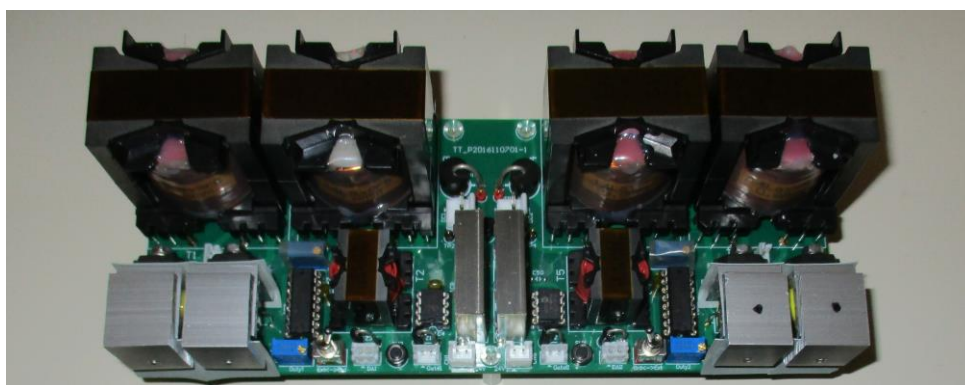
PWM 専用 IC による制御基板を試作した。

PWM 制御は外部能動素子にて調整し Gate 信号を入力することでパルスを制御できることを確認した。



【試作実験用 PWM 制御基板】

これら 3 方式には一長一短がある。MPU に搭載されている PWM 制御機能を使用する方法（ソフトウェア制御）は回路規模を小さくできるが、ソフトウェア制御のためバグによる誤動作とタスク処理によっては安定したパルス幅が確保できない。次に、FPGA による PWM 制御回路を設計し制御する方法（ハードウェア制御）は、ハードウェア制御なので高安定したパルス制御が可能であるがデバイスのコスト面とノイズに弱い面がある。PWM 専用 IC による制御する方法（ハードウェア制御）は、ハードウェア制御なので高安定したパルス制御が可能でありデバイスの価格も安く制御しやすいが形状が大きくなる。最終的には、安定性とコスト面を考慮して PWM 専用 IC による制御する方法とした。下の写真の PWM 制御電源基板を新規に設計、開発して、パルス幅 5ms~50ms の高安定 X 線パルス制御回路を達成した。これにより、高速での 3 管撮影制御が実現できた。



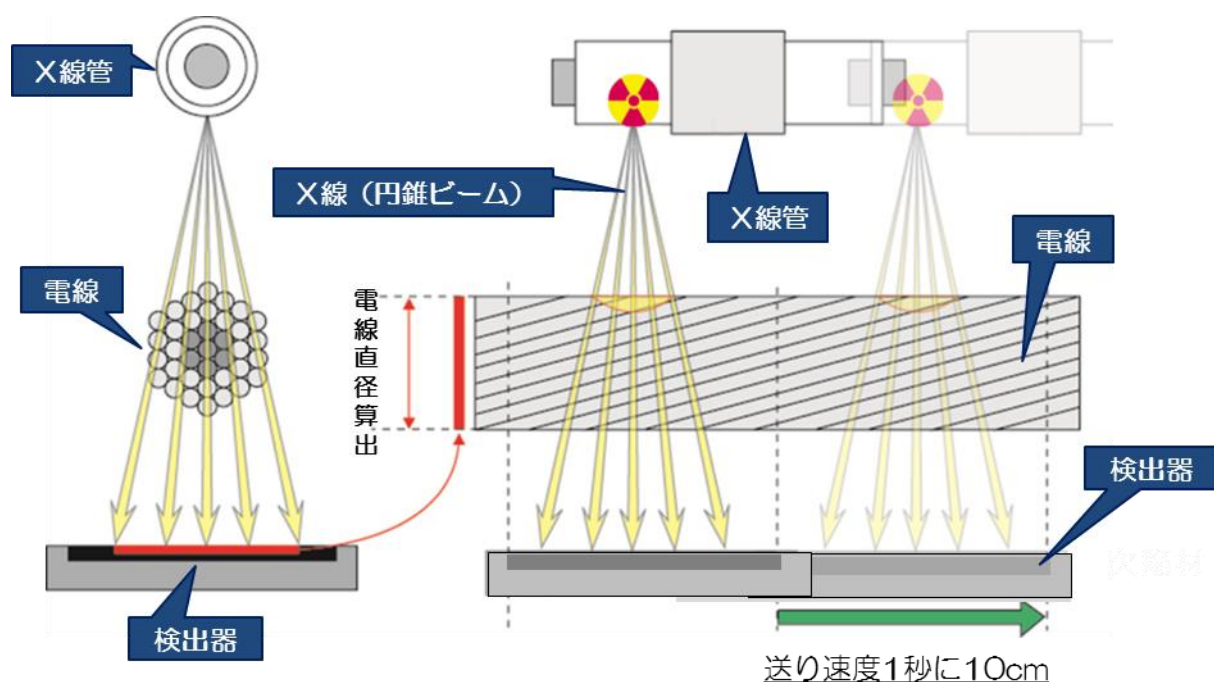
【PWM 制御ドライブ基板】

【2. 高速3方向検査技術の開発】

【2-1】 X線源と検出器の三方向高速同期撮像の開発

研究内容

10mの長さを100秒で検査するため、本装置本体部の送り速度を10cm/sにする。ここで、送電線を移動しながら検査するにはX線検出器の幅が10cmで送り速度が1秒に10cmの場合、精度0.5mm以下にするには、X線のパルス幅が5ms以下とする。また、1秒に10cm移動するが、撮影は静止して5ms~10ms×3方向で15ms~30msで撮影し、あと残り0.985秒~0.97秒で10cm移動して撮影する場合も、電線検査を100秒で10m行えるよう、X線検出器の幅が10cmで送り速度が1秒に10cmとする。この5ms~10msの短パルスX線を発生可能なパルスX線源と高速読み出しが可能な2次元X線検出器とを組み合わせる。パルスX線源は、5ms~10msのパルスX線を3方向から照射し、対応する3方向の検出器の検出画像のノイズを少なくするため、検出器側の露光タイミングをmsオーダで制御するX線源と検出器の高速同期回路を開発する。高速検出器としては電線検出のため、長さ10cm×幅5cmの細長い約100μmピッチCMOS検出器にする。X線照射は下図右側の緑矢印のように検出器の検知領域10cm毎に装置を移動しながら撮影する。この3方向からの撮影画像は地面に高速無線通信モジュールで高速無線伝送され、リアルタイム表示で欠陥を確認可能とする。



【装置の撮影模式図】

成 果

既製品であるX線検出器の性能を確認し、検出領域と分解能が送電電線の欠陥検出にどの程度影響するか実証試験を行い、以下の仕様の検出器を選定した。

モデル	画素サイズ	取込みエリア	インターフェース	フレームレート	ピクセルピッチ	A/D	X線エネルギー範囲
Shad-o-Box シリーズ							
Shad-o-Box 512/ EV	512×1024	24.6×49.2mm	LVDS	2.7 fps	48 μm	12/14bit	10-50kV(160kVまで)
Shad-o-Box 1024/ EV	1024×1024	49.2×49.2mm	LVDS	2.7 fps	48 μm	12/14bit	10-50kV(160kVまで)

Shad-o-Box HS シリーズ							
Shad-o-Box 512 HS	512×768	69×104mm	GigE	35 fps	135 μm	14 bit	10-225kV
Shad-o-Box 688 HS	688×1032	68×102mm	GigE	66 fps	99 μm	14 bit	10-225kV
Shad-o-Box 1024HS	768×1024	104×138mm	GigE	35 fps	135 μm	14 bit	10-225kV
Shad-o-Box 1280 HS	1280×1280	128×128mm	GigE	30 fps	100 μm	14 bit	10-225kV
Shad-o-Box 1548 HS	1032×1548	102×153mm	GigE	32 fps	99 μm	14 bit	10-225kV
Shad-o-Box 3K HS	1300×2304	64×114mm	GigE	22 fps	49.5 μm	14 bit	10-225kV
Shad-o-Box 6K HS	2304×2940	114×146mm	GigE	9 fps	49.5 μm	14 bit	10-225kV

Rad-icon シリーズ <i>New</i>							
Rad-icon 1520	1548×2064	153×204mm	GigE	20 fps	99 μm	14 bit	10-225kV
Rad-icon 2022	2064×2236	204×221mm	CameraLink	30 fps	99 μm	14 bit	10-225kV
Rad-icon 3030	3096×3100	306×307mm	CameraLink	30 fps	99 μm	14 bit	10-225kV

Remote RadEye シリーズ							
Remote RadEye 1 EV	512×1024	24.6×49.2mm	LVDS/GigE	2.7fps	48 μm	12 bit	10-160kV
Remote RadEye 2/ EV	1024×1024	49.2×49.3mm	LVDS/GigE	2.7fps	48 μm	12 bit	10-50kV/(160kVまで)
Remote RadEye 4/ EV	1024×2048	49.2×98.6mm	LVDS/GigE	2.7fps	48 μm	12 bit	10-50kV/(160kVまで)
Remote RadEye 200/ EV	1000×1024	96.0×98.4mm	LVDS/GigE	0.75fps	96 μm	12 bit	10-50kV/(160kVまで)
Remote RadEye HR	1246×1650	24.9×33.0mm	Direct USB	1.0fps	20 μm	12 bit	10 - 90 kV

Rad Eye シリーズ							
Rad Eye 1 / EV	512×1024	24.6×49.2mm	アナログ	-	48 μm	-	10-50kV/(160kVまで)
Rad Eye 2 / EV	1024×1024	49.2×49.3mm	アナログ	-	48 μm	-	10-50kV/(160kVまで)
Rad Eye 4 / EV	1024×2048	49.2×98.6mm	アナログ	-	48 μm	-	10-50kV/(160kVまで)
Rad Eye 8 / EV	2048×2048	98.4×98.6mm	アナログ	-	48 μm	-	10-50kV/(160kVまで)
Rad Eye 100 / EV	512×1024	49.2×98.3mm	アナログ	-	96 μm	-	10-50kV/(160kVまで)

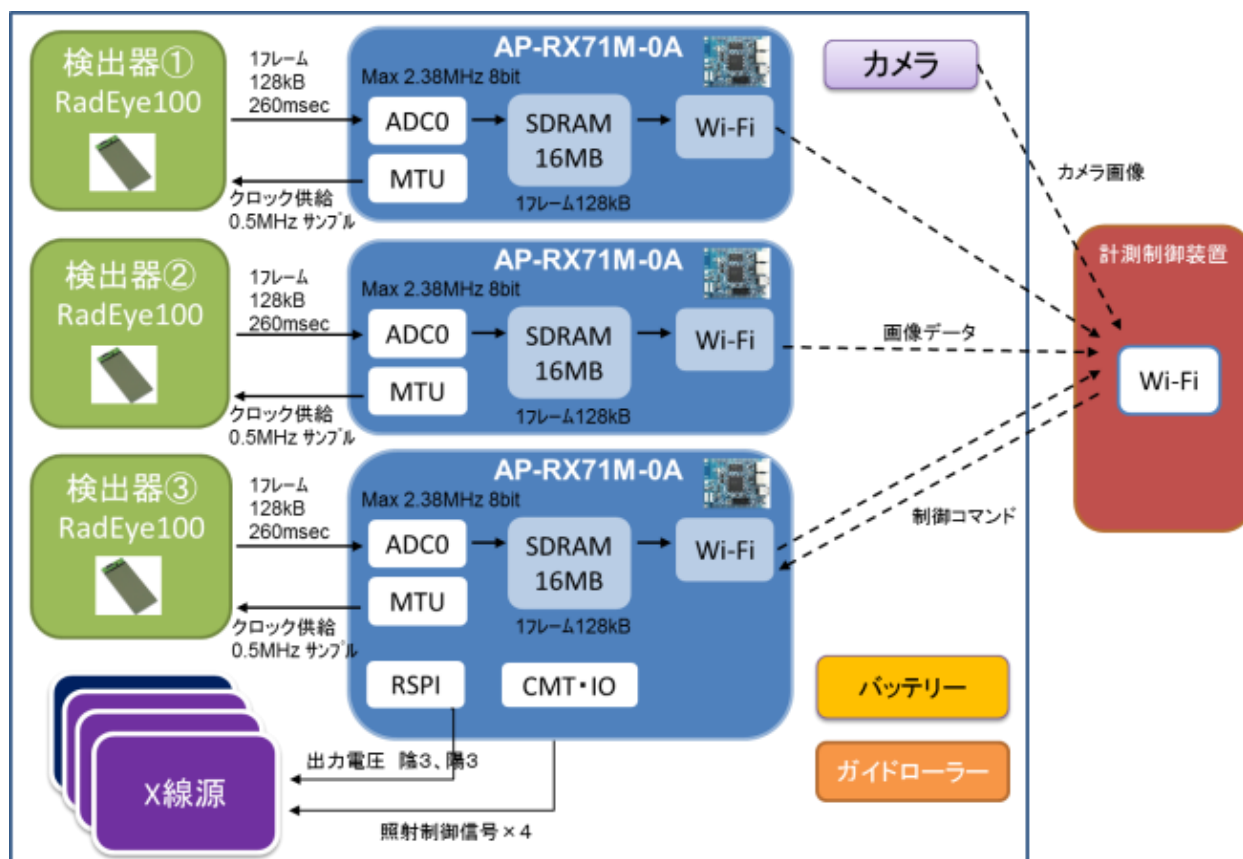
※EVは10-160kV

既製品であるX線検出器を本装置に実装するにはコントローラが非常に大きく、3台の検出器を設置するためにはコントローラが3台必要で本装置の小型化を考慮する上で現実的でない。



【既製品のX線検出器】

コントローラ形状の課題を克服すべく、選定したX線検出器の検出デバイスのみを使いコントローラを自社開発した。以下にX線検出デバイス制御ブロック図になる。高速AD搭載のMPUを使用してアナログ信号をサンプリングしデジタル信号として無線で計測制御装置に転送する。



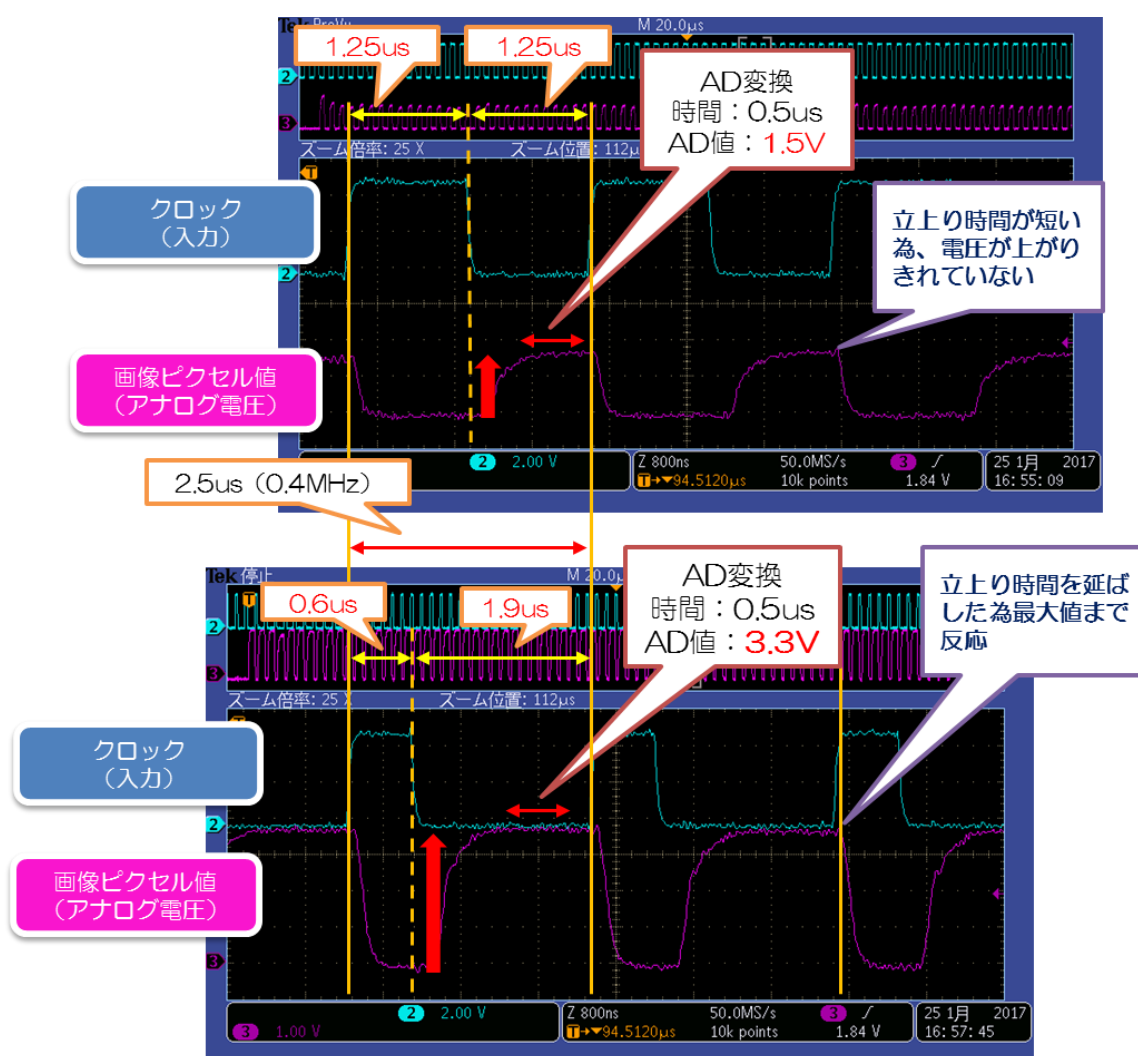
【X線検出デバイス制御ブロック図】

検出デバイスはクロック信号を入力すると、それに同期したピクセル単位のアナログ信号が出力される。下図が検出デバイスに入力するサンプリング周波数と検出デバイスの出力信号関係になる。アナログ信号の応答特性が悪く、サンプリングクロックの周波数を上げると画像の分解能が落ちる課題をサンプリング周波数のデューティ比を変更することで改善できた。

これにより安定領域の信号をサンプリングすることが可能となり、転送スピードの改善につながった。

同じクロック周波数で通常の50%デューティでは、下図のように1.5Vの応答でしたが、デューティ比を変更することで応答特性は3.3Vと倍以上良くなった。

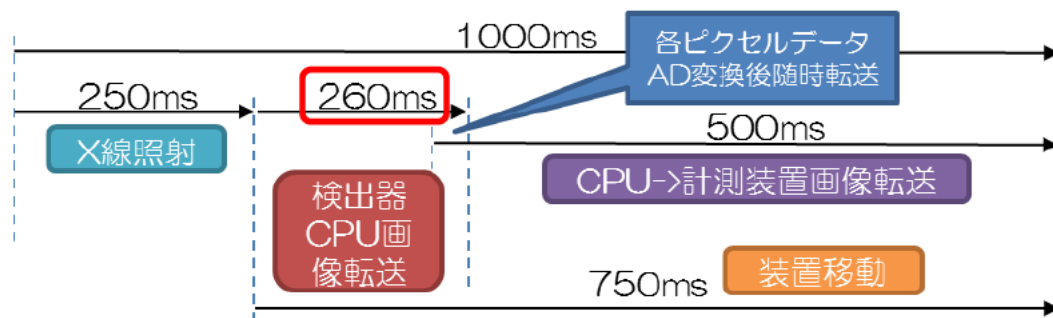
デューティ比を変更し応答特性が良くなったことで、サンプリングクロック周波数を0.2MHzから0.4MHzに高速化を実現し、それにより転送速度は520msから260msと約半分に短縮できた（次ページ：X線照射と検出デバイス制御のタイミングチャート図参照）。検出画像の分解能を落とすことが可能であれば更に高速化が可能になる。



【検出デバイスの応答特性】

Ｘ線検出デバイス制御用マイコンモジュールでＸ線源の照射制御を行うことで３方向高速同期による撮像を実現した。

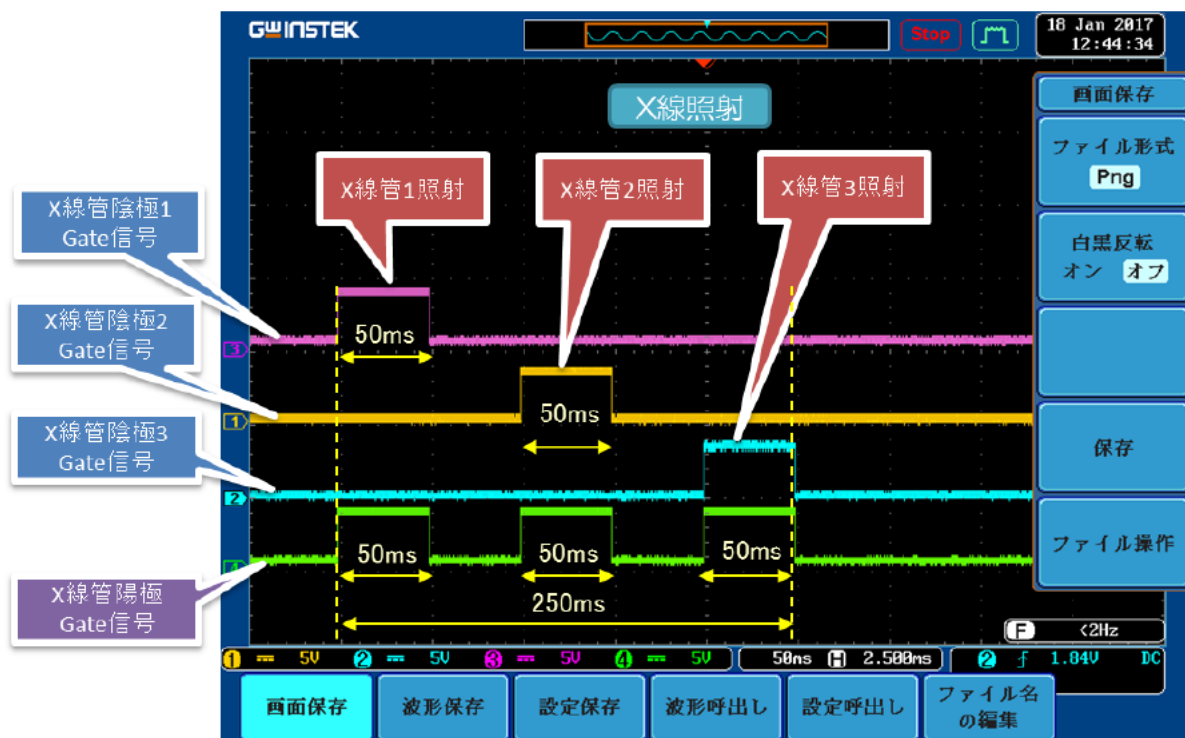
また既製品の検出器ではなく、検出デバイスを採用したことで検出部形状の自由設計が可能となり装置全体の小型化に成功した。



※サンプリングクロック周波数：0.4MHz

【Ｘ線照射と検出デバイス制御のタイミングチャート】

下図はＸ線照射内の詳細タイミング図になる。共通化したＸ線管３管の陽極電源を陽極 Gate 信号で制御し、各々のＸ線管の陰極電源を各々の陰極 Gate 信号で制御する。

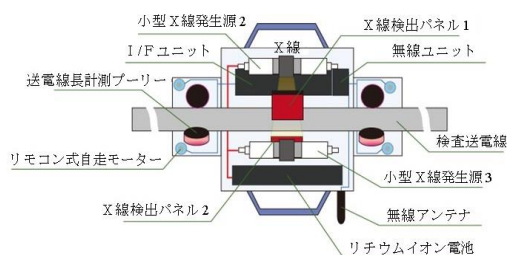


【Ｘ線照射のタイミングチャート】

【2-2】自走式ガイドローラの開発

研究内容

電線は、水平の部分だけでなく、鉄塔付近では若干スロープがある。これを考慮して、ガイドローラ部に十分な出力を有するモーター及び強度が高い機械部品からなる自走機構を設ける。これら機械駆動部は、装置に位置センサ、角度センサ、傾斜センサを有し、装置のバランスを取りながら重量 20kg で安定して自走する駆動力を備えるガイドローラを過去の知見をもとに開発する。この時、ここで、電線等の検査装置の移動機構の製作経験のある本開発のアドバイザーである北日本電線株式会社のアドバイスも参考にしつつ、電線を安定して自走するガイドローラを開発する。

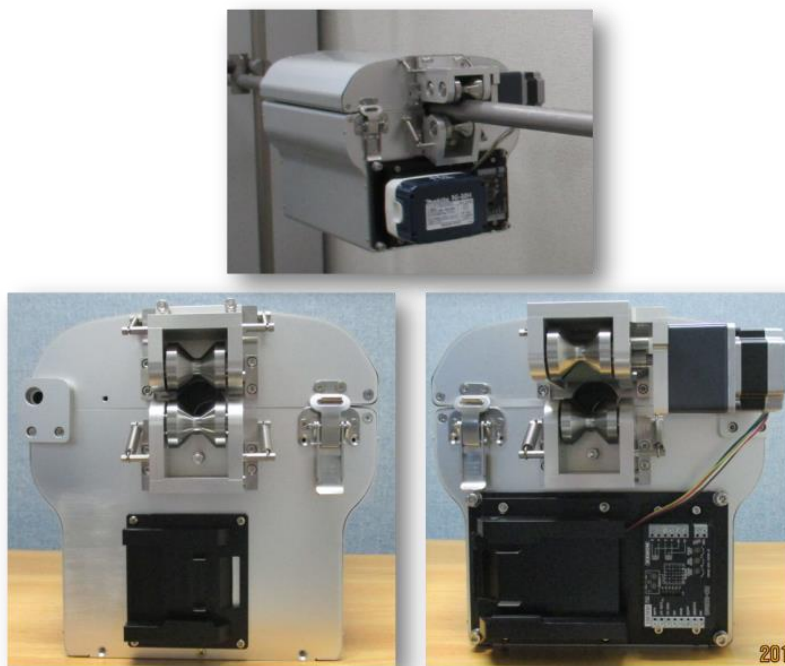


【装置断面図】

成 果

送電線上をX線検査装置が自走するための駆動装置の開発を行った。

装置の軽量化とパワーのある駆動モーターの選定は相反するためガイドローラーと駆動用ローラーの構造設計が重要であった。駆動用のローラーは、電線ケーブルとの摩擦係数を想定してゴム系の材質を選定し、ガイドローラーにてケーブルを挟む嵌合力を上げる事で電線の傾斜角 15 度の走行を実現した。また自走速度 10cm/s での走行を確認した。

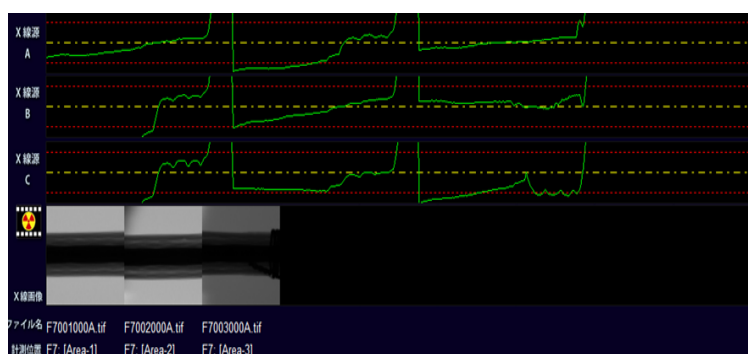


【自走用駆動装置】

【2－3】電線欠陥検出ソフトウェアの開発

研究内容

本事業で開発するX線検査装置は、鉄塔と鉄塔の間に架けられている送電線の異常を検査する装置で、検査に必要なX線は送電線を透過し、内部の異常までX線透過像から判断できるソフトとする。また本開発では、5ms～10msのパルス幅にあわせて検出器の露光時間を合わせて3方向から撮像した検出画像から専門家でなくても電線の欠陥、腐食による太さの増加を検出できるソフトとする。下図がその3方向の透過像を表示した画面イメージである。

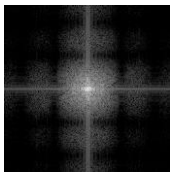
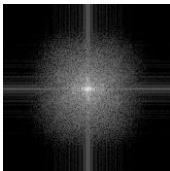
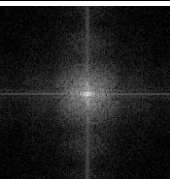


【電線の3方向表示ソフトウェア画面例】

成 果

3方向から撮像した検出画像に画像処理（フィルタリング）を行い電線の欠陥、腐食による太さの増加を自動検出できるソフトを開発した。

検出デバイスから得られた画像はきれいな画像ではなくノイズやボケた画像が多い。検出デバイスにあった専用ノイズフィルタの開発を行い、最適化された専用の画像処理方法にてノイズの除去を行った。

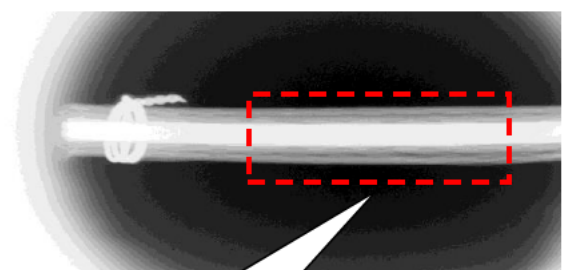
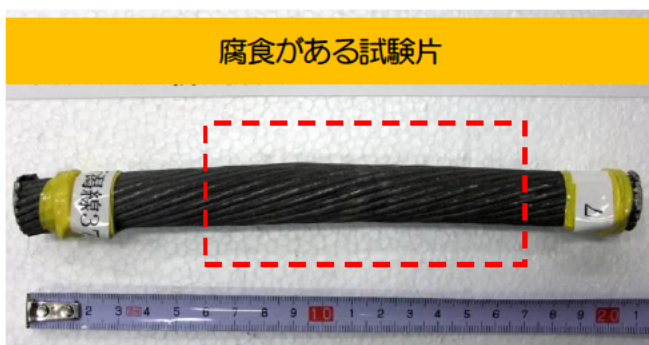
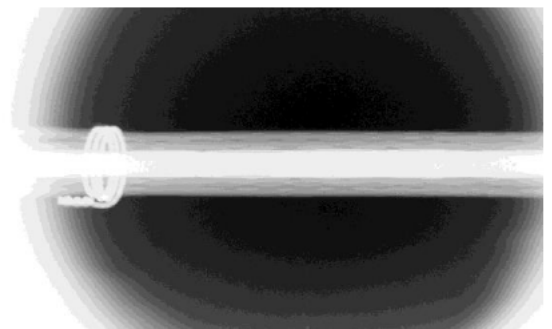
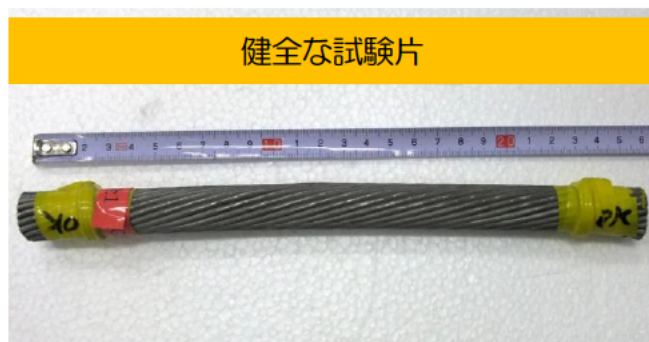
ノイズ除去フィルタ	二次元フーリエ変換で ノイズ除去効果を比較	長所・短所
移動平均フィルタ		△ 高周波成分の除去 足りない
ガウシアンフィルタ		○ 高周波成分の除去 良い（処理が軽い）
メディアンフィルタ		× 処理が重たい

【画像ノイズ低減処理】

画像エッジ認識用フィルタ	長所・短所
微分フィルタ	× ノイズに弱い
プリューウィットフィルタ	△ 高周波成分の除去 足りない
ソーベルフィルタ	○ 高周波ノイズに強い

【画像エッジ認識処理】

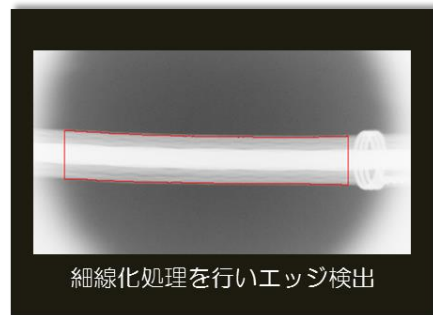
電線欠陥には、腐食するとその直径が太くなる現象が見られる。その太さの増減を3方向から撮影した画像にて判定することで検出精度の向上を実現した。



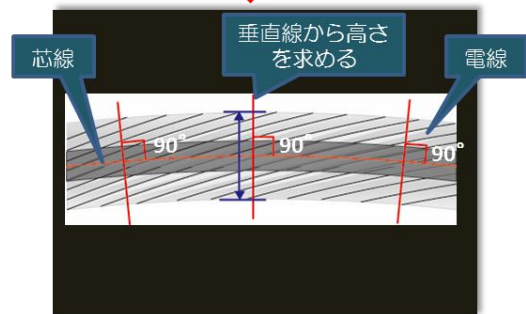
腐食あるところが膨張して
透過画像に変化がある



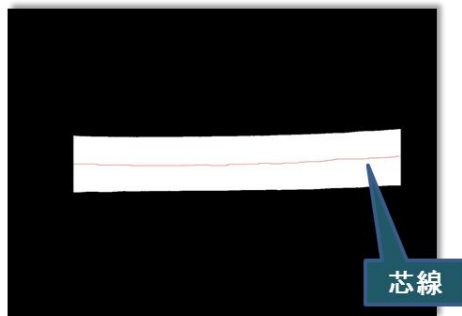
電線の輪郭2値画像を得る



細線化処理を行いエッジ検出



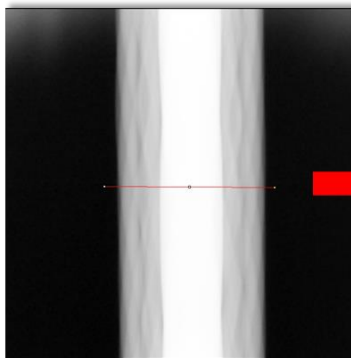
芯線とエッジ線の垂直線から高さを求める
湾曲した電線でも、正確に直径を算出



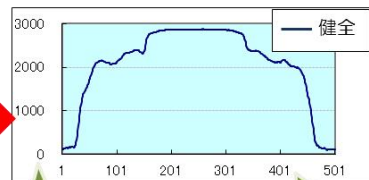
電線の芯線を得る

【電線のエッジから芯線を求め電線直径を算出】

【健全試験片の透過率解析】



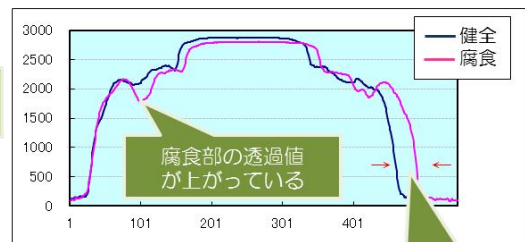
健全試験片
赤線部の透過率グラフ



縦軸：輝度値

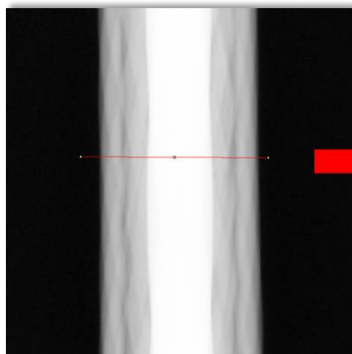
横軸：試験片直径

健全な試験片と腐食試験片の透過率
グラフを重ねて表示

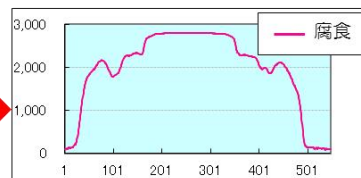


試験片健全なものと同食により
直径が太くなった差を表す

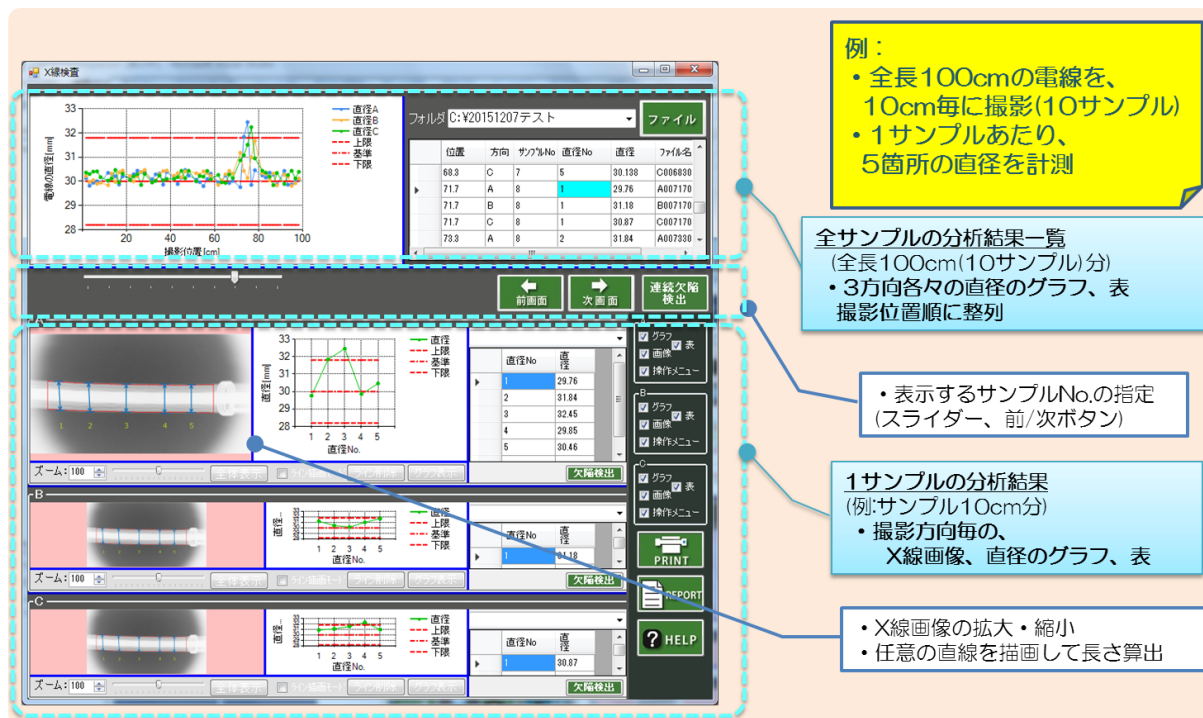
【腐食試験片の透過率解析】



腐食がある試験片
赤線部の透過率グラフ

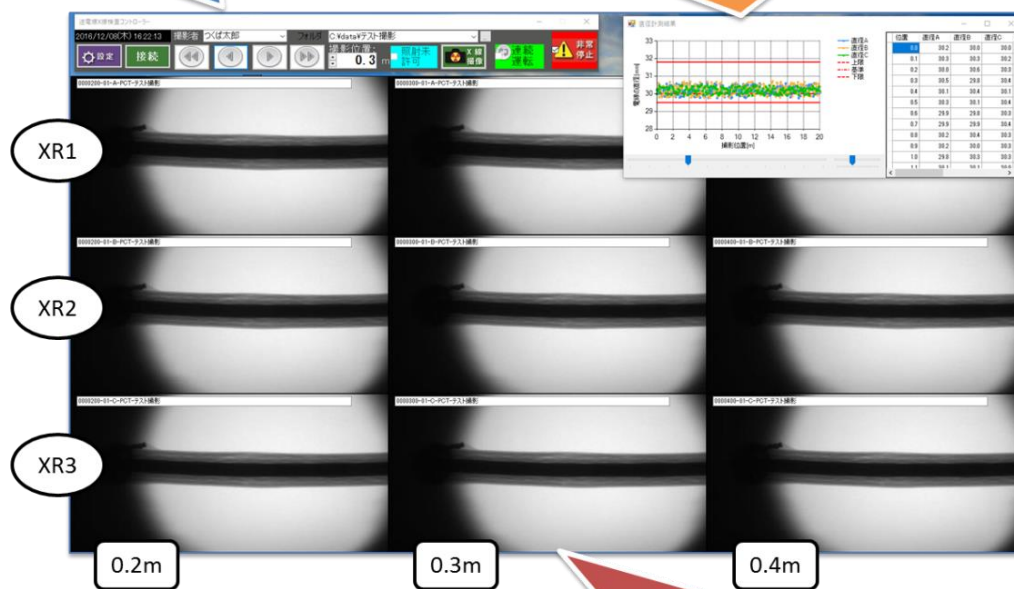


【電線の透過値を測定する】



(1)撮影及び撮影画像表示操作

(2)計測した電線の直径の一覧表、グラフ



(3)送電線のX線撮像

・3方向の撮像を、撮像位置とその前後を並べて表示

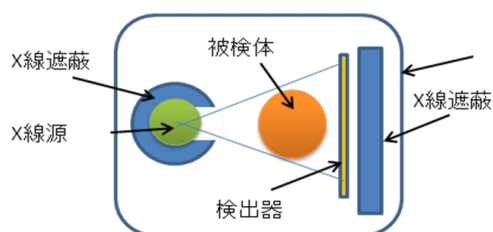
【電線欠陥検出ソフトウェア画面】

【3. 小型安全な検査装置の開発】

【3-1】1時間当たり $0.6\mu\text{Sv}$ 以下の遮蔽材の設計

研究内容

本装置では、鉛によるX線遮蔽を採用して、漏えいするX線を遮蔽し、装置の外側より10m離れた場所で $1.3\text{mSv}/3$ か月以下まで漏えいX線量を下げる。その際下図のようにX線の遮蔽としてはできるだけX線管の近くで遮蔽することによって、少ない遮蔽材で効率的に遮蔽する。また、検出器側のX線も検出器のすぐ後ろに遮蔽材を配置することで最小限の遮蔽材とする。このように鉛の量をできる限り減らし、効率的に遮蔽材を施すことにより重量を抑える。実際にX線を遮蔽するために必要な装置の鉛の厚さは、以下のように求める。鉛の 100keV 程度のX線に対する質量減弱係数は、 $3\text{cm}^2/\text{g}$ である。鉛の比重を $11.34\text{g}/\text{cm}^3$ として、この値から線減弱係数を求めると、 34cm^{-1} となる。この線減弱係数をもとに鉛の厚さは 0.6 マイクロシーベルト/時間以下に減衰するための装置のX線漏えい線量を実測して計算から求める。

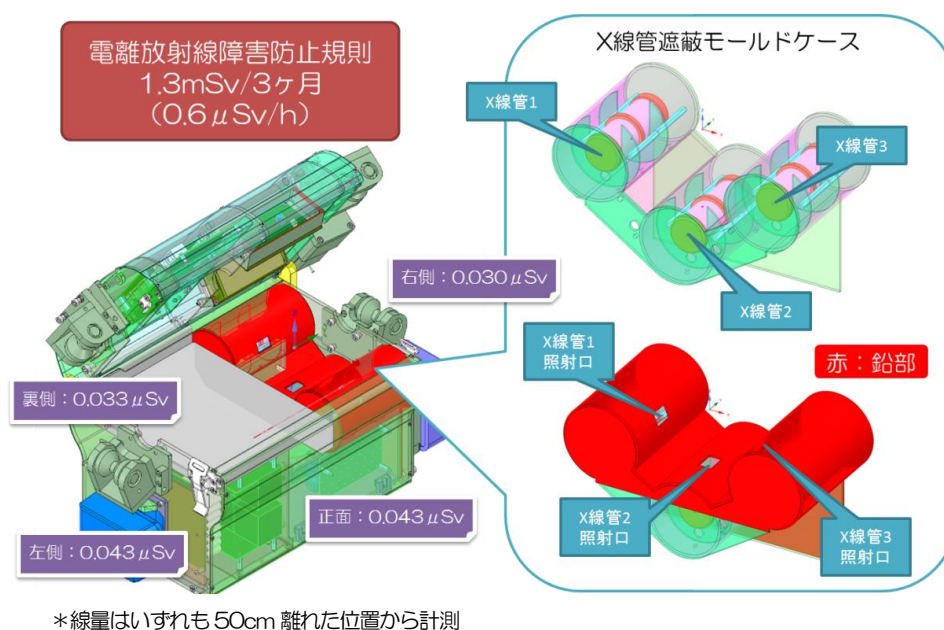


【漏えいX線の効率的遮蔽】

成 果

電離放射線障害防止規則には $1.3\text{mSv}/3$ か月までと記載されている。換算すると1時間当たり $0.6\mu\text{Sv}$ になる。本装置は10m以上ある高所の高電圧送電線を検査するため10m離れた地面で電離放射線障害防止規則を満たすX線遮蔽設計を行った。

また軽量化を重視し、必要最低限の鉛遮蔽材で効率的に遮蔽することで $0.6\mu\text{Sv}/\text{h}$ 以下の数値目標を達成した。



【X線遮蔽ケースの設計】

【3-2】軽量化筐体の製作

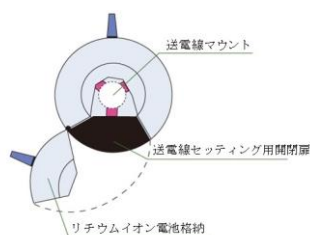
研究内容

これまで他の用途のために可搬型で 120kV 管電圧の X 線源（重量約 4kg）の開発に成功しており、これを本開発の装置用に最適化して X 線源重量を 1 個あたり 3kg 以下とする。そうすると、X 線源の重量は、1 個 3kg×3 方向で 9kg、検出器の重量は 1 個約 1kg×3 方向で約 3kg で、これら合計約 12kg となる。

また、X 線が検出器に照射される範囲以外の部分は、できるだけ X 線管の近くで遮蔽することにより、遮蔽材の量を最小限に抑えることができる。X 線管の外径が 5cm の場合、外径 5cm、厚さ 5mm、長さ 5cm の鉛の遮蔽材の体積は約 35cm^3 であり、重量は 400g である。そして、5cm×10cm の検出器の後ろに鉛をつけて遮蔽する場合、鉛のサイズ 5cm×10cm×0.5cm とした場合の鉛の重量は約 300g である。この他に散乱 X 線を遮蔽するため金属板で X 線源・検出器を覆うとしてその分を 1 個あたり 300g 以下とすると遮蔽材の総重量は X 線源 1 個あたり 1kg で、X 線源 3 個で約 3kg 以下に抑えることができると考えられる。

あとは、その他バッテリー、回路、ケーブル、外側ケース等の重さを約 4kg と考慮して、装置全体で約 12kg+約 3kg+約 4kg=約 19kg となり、目標 20kg 以下にしていける。

また、本装置の対向して付いている 3 方向の X 線源と検出器の位置関係を崩さないで筐体の一部を開閉して送電線に簡単に装置を装着できる以下のような機構とする。



【装置の開閉機構】

成 果

X 線源（X 線管）、検出部、電源基板の小型設計を重視し装置筐体の製作を行った。内部の部品配置配線を考慮し形状の最適化を図ったが、試作段階で金属筐体とバッテリーは重く、装置全体の重量は 27kg となっている。将来製品化する時、樹脂筐体と軽量化バッテリーを採用すれば、重量 20kg 以下は可能である。



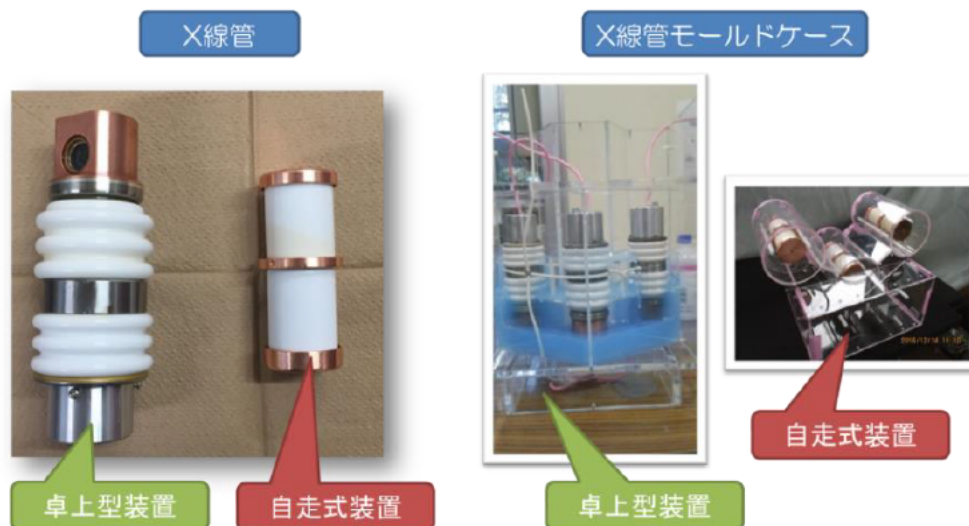
【第一試作卓上装置】



【小型自走式装置（完成品）】

- X線管及びX線源の小型化

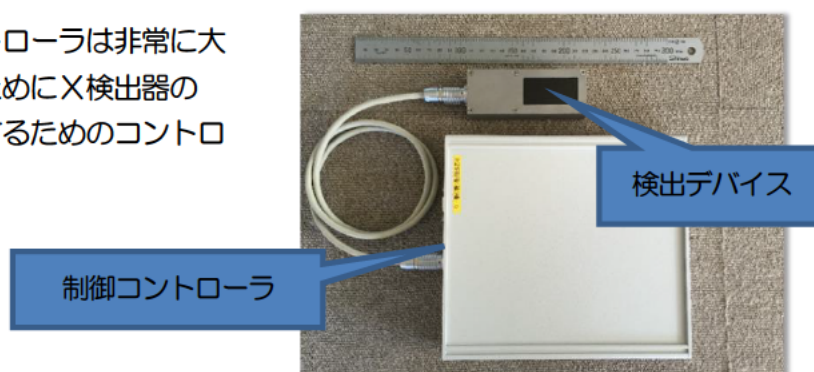
小型にすることで一番難しいのは電極間の絶縁とセラミック素材と電極を接合するろう付けにある。試作実験を重ねて、小型のX線管が完成したが歩留りが悪く、安定した品質を追究するには課題が多い。



【X線管及びX線源の小型化】

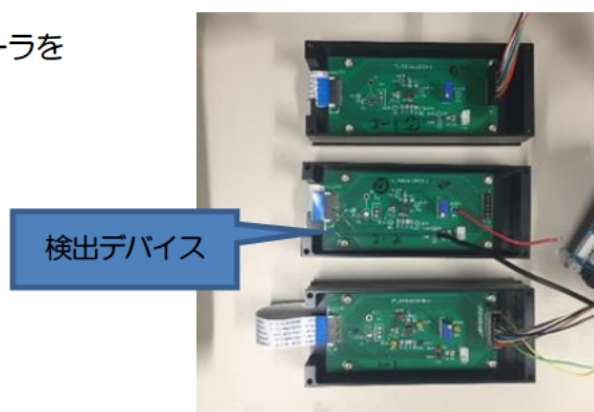
- 検出部の小型化

既製品のX線検出器のコントローラは非常に大きい。小型筐体を実現するためにX検出器の検出デバイスを購入し制御するためのコントローラの自社開発を行った。



【X線検出器（既製品 1 個）】

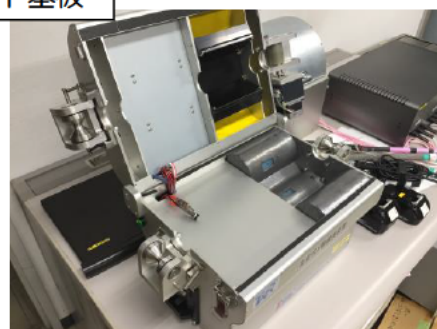
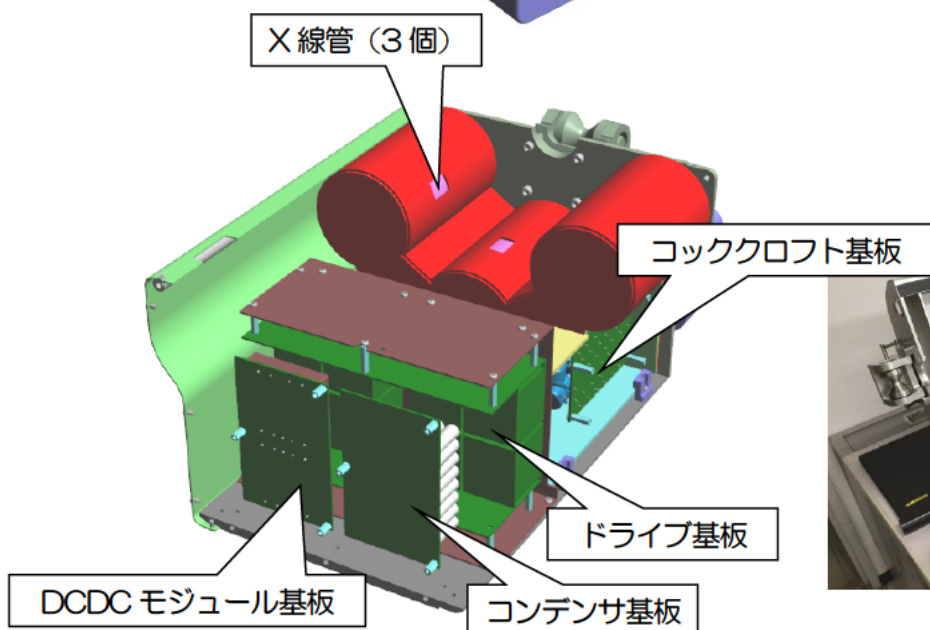
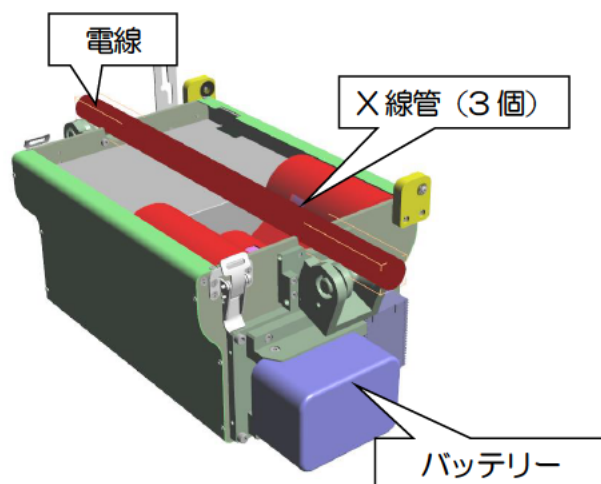
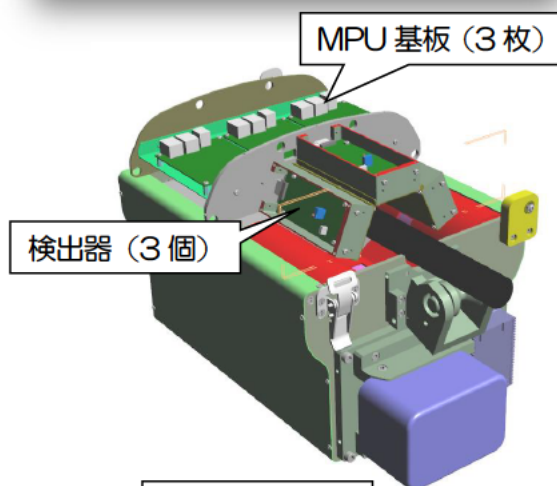
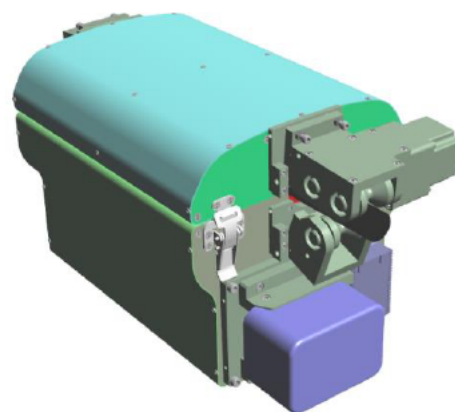
検出デバイスと同形状の制御コントローラを自社開発し小型化を実現した。



【自社開発X線検出器（3 個）】

- 電源部の小型化

電源入力回路基板、コンデンサ基板、高電圧発生用ドライブ基板の小型設計を行い装置内部の配置を工夫し全体の小型化を実現した。



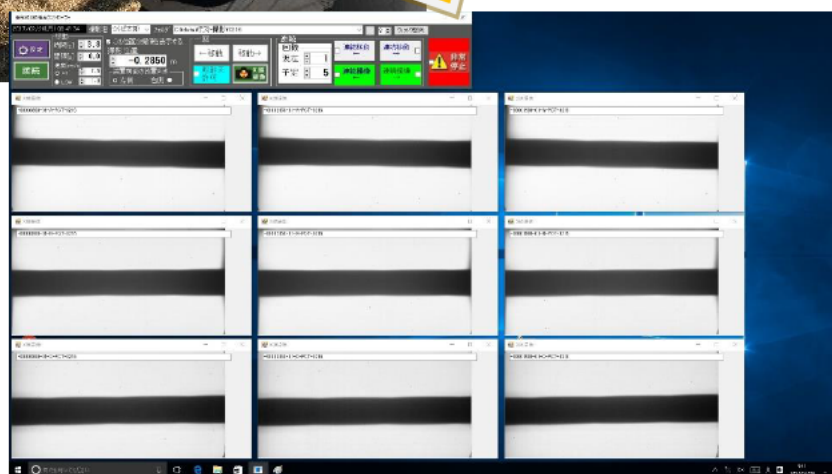
【装置内部の配置】



【完成品（室内試験）】



【屋外実地試験の様子（宮城県）】



【撮影したX線画像（リアルタイム無線通信のPC画面）】

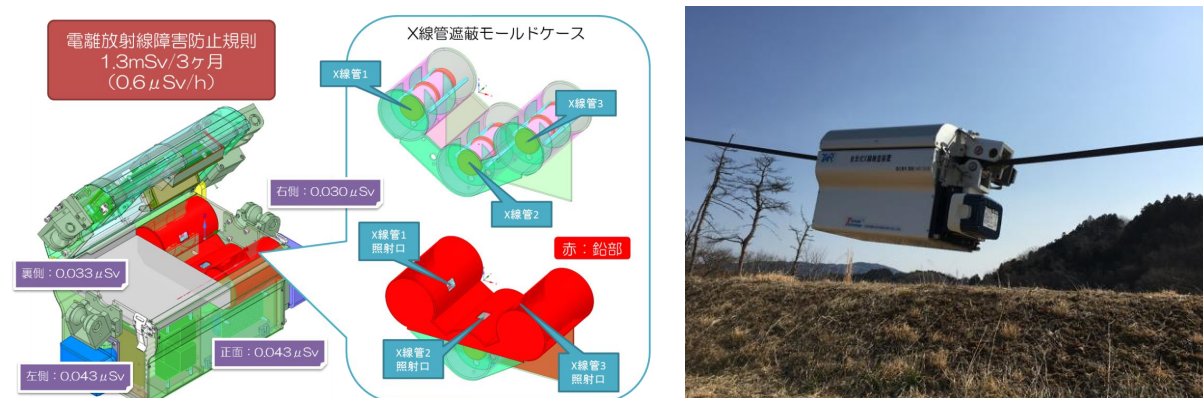


【実地試験風景】

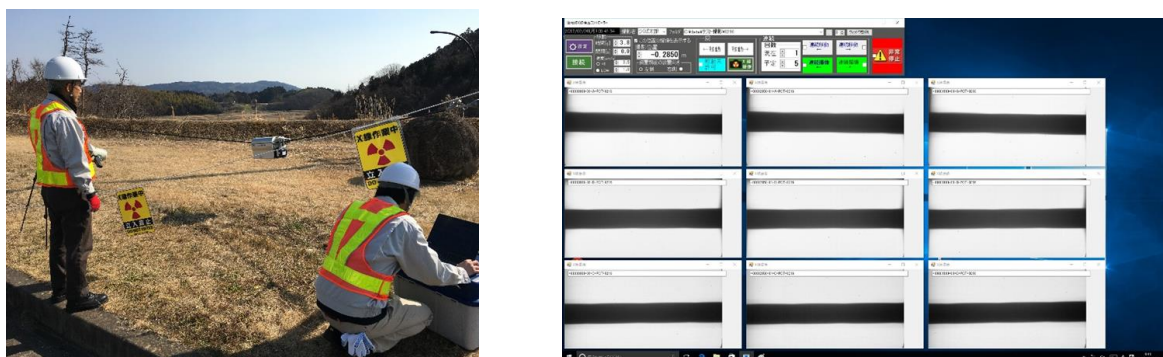
最終章 全体総括

複数年の研究開発成果

X線管3管照射を達成し、検出器のスピード目標 10cm/s に対して、自走速度 5cm/s 安定自走を実現し、3方向撮影X線画像表示プログラムを開発し、漏えい線量目標 1.3mSv/3ヶ月以下を達成し、X線管の小型化とX線源の陽極電源の共通化により装置の小型化を進め、装置全体で 20kg 以下という目標に対して 27kg の下図のような電線欠陥検出用小型自走式 X線検査装置を完成した。そして、現場配電線による自走3方向X線撮影試験を実施し、装置の性能を確認した。



【電線欠陥検出用小型自走式 X線検査装置内部と自走時装置外観】



【電線欠陥検出用小型自走式 X線検査装置の自走実験風景と配電線の3方向撮影X線画像】

研究開発後の課題

課題目標に関して、自走速度と装置重量の目標を達成できなかったが、実用可能な製品を完成することができた。今後は実証試験を重ねて厳しい屋外環境に対応した現場で使いやすい製品に仕上げる。また電線の腐食状態のデータを集めデータベース化し更なる高速判定に力を注いでいくつもりである。

研究開発後の事業化展開

(1) 補助事業の成果が寄与すると想定している具体的なユーザー、マーケット

ユーザーである電線メーカー、電線検査会社、電力会社等を当初のメインターゲットとしていたが、これ以外にもエレベータのワイヤーや吊り橋のロープ検査にも活用できないか、現在鋭意検討中。

(2) 補助事業の成果・効果の価格的・性能的な優位性、事業化見込み

既存のX線検査装置は存在するが、自走式3方向撮影の装置は存在せず、価格的・性能的な優位性は高い。事業化の見込みについて、先ずはサンプルのデモ、レンタル、検査サービスを行い、認知度を上げることから着手する。初号機の販売は30年度と見ており、納品先は北日本電線株式会社を想定している。当補助事業のアドバイザーでもある北日本電線株式会社で昨年度実証試験を行った。

(3) 事業化に至るまでの遂行方法や今後のスケジュール

年 度	29年度	30年度	31年度	32年度	33年度	34年度
追加研究	→					
実証試験		→				
設備投資			→			
製品等の生産			→			
製品等の販売			→			
販売数量(台)	—	2	5	10	20	50
販売価格(千円/台)	—	30,000	30,000	25,000	20,000	20,000
売上高(千円)	—	60,000	150,000	250,000	400,000	1,000,000
備 考	①事業展開 デモサンプルの貸し出しやレンタルサービス、検査サービスを行い装置の必要性・認知度を上げる。 ②販売数量 送電線・総長8万km÷100km/台＝800台（全体）検査可能電線を半分としても約400台の需要の可能性はある。 ③販売価格 製造方法の改善が必要。製造コスト低減が課題。 ④その他 X線管製造品質向上（安定供給）					

以上