

電気技術史研究会 HEE-19-031

# 送信用アレキサンダーソン型高周波発電機

東芝エネルギーシステムズ株式会社

京浜事業所

中村 英之

**TOSHIBA**

2019年10月4日

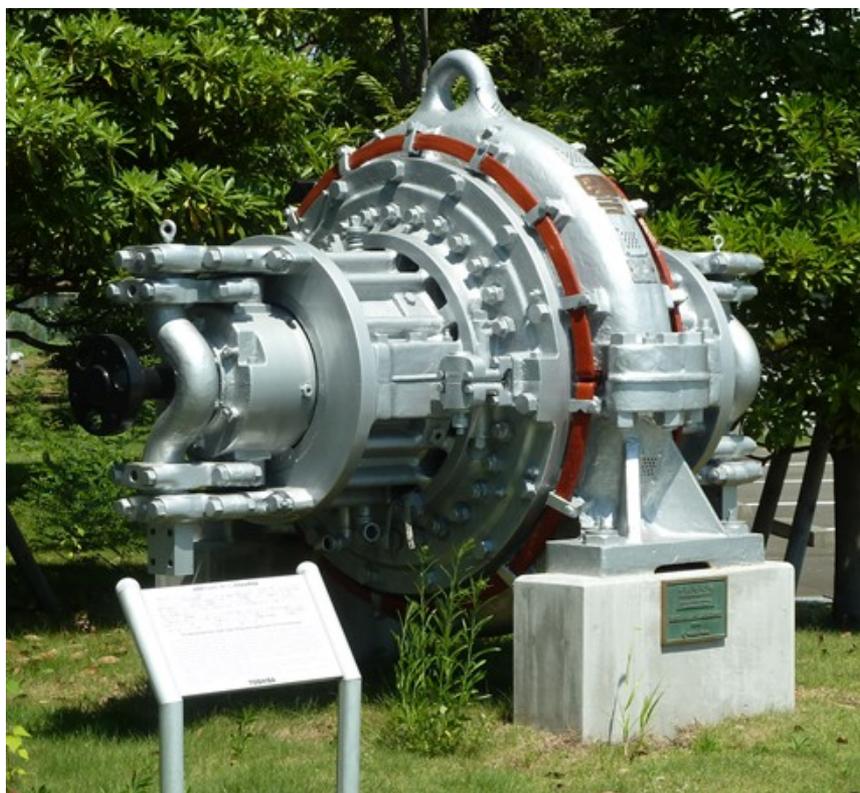
ECSK2019H0148

F19108

F19132

# 125kVAアレキサンダーソン型高周波発電機

- 設計・製造 : 芝浦製作所
- 製造年 : 大正9年（1920年）製造（完成は大正10年，1921年）
- 定格 : 125kVA-480極-3000rpm-400V-312A-12000Hz
- 佐世保無線電信所（針尾送信所）に送信機の一部として配備
- 第12回「でんきの礎」顕彰（2019年3月）



東芝エネルギーシステムズ  
京浜事業所（横浜市鶴見区）  
2019年8月撮影

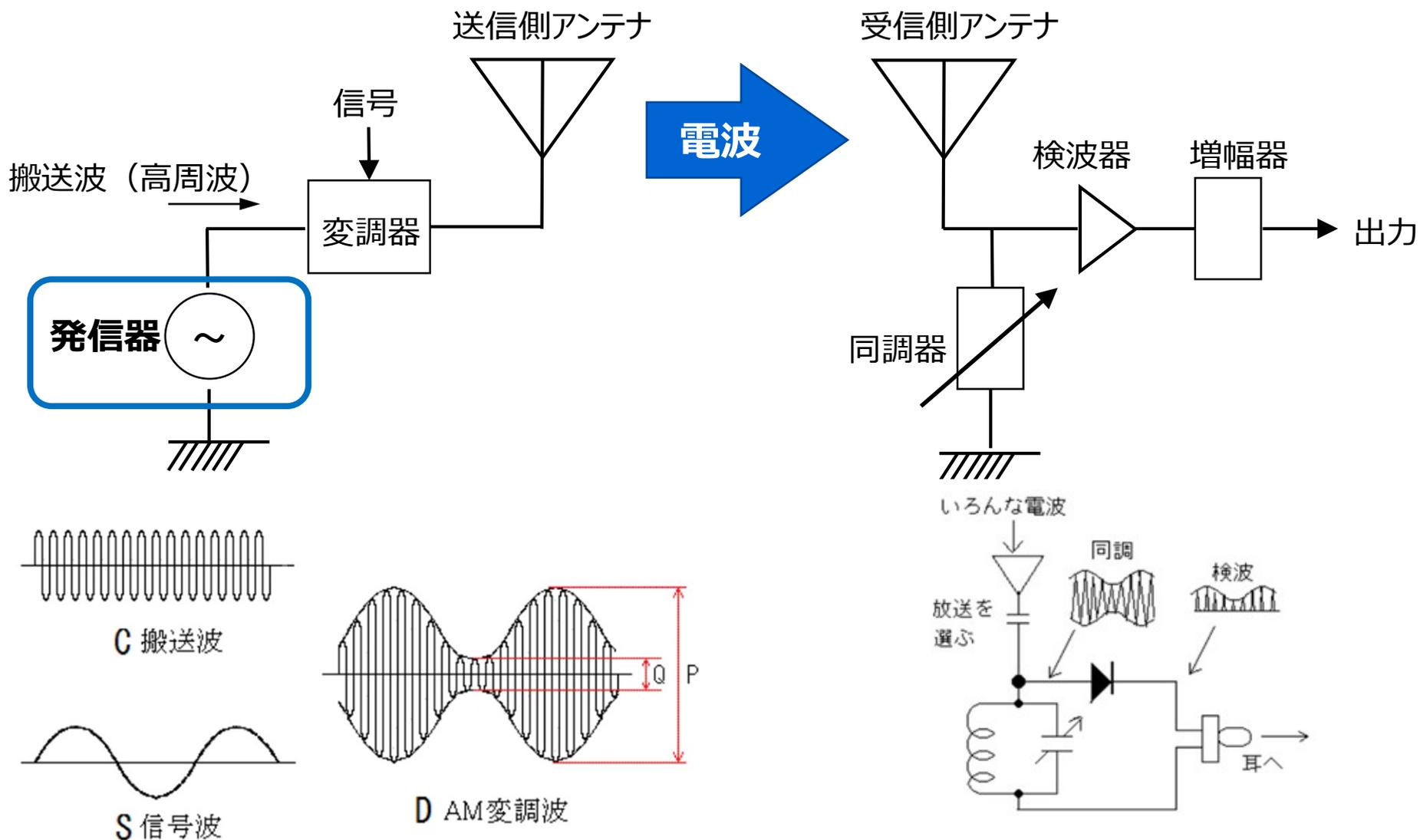
# Contents

- 01 アレキサンダーソン発電機とは
- 02 125kVA高周波発電機紹介
- 03 芝浦製作所における開発製造
- 04 まとめ

# 01

## アレキサンダーソン発電機とは

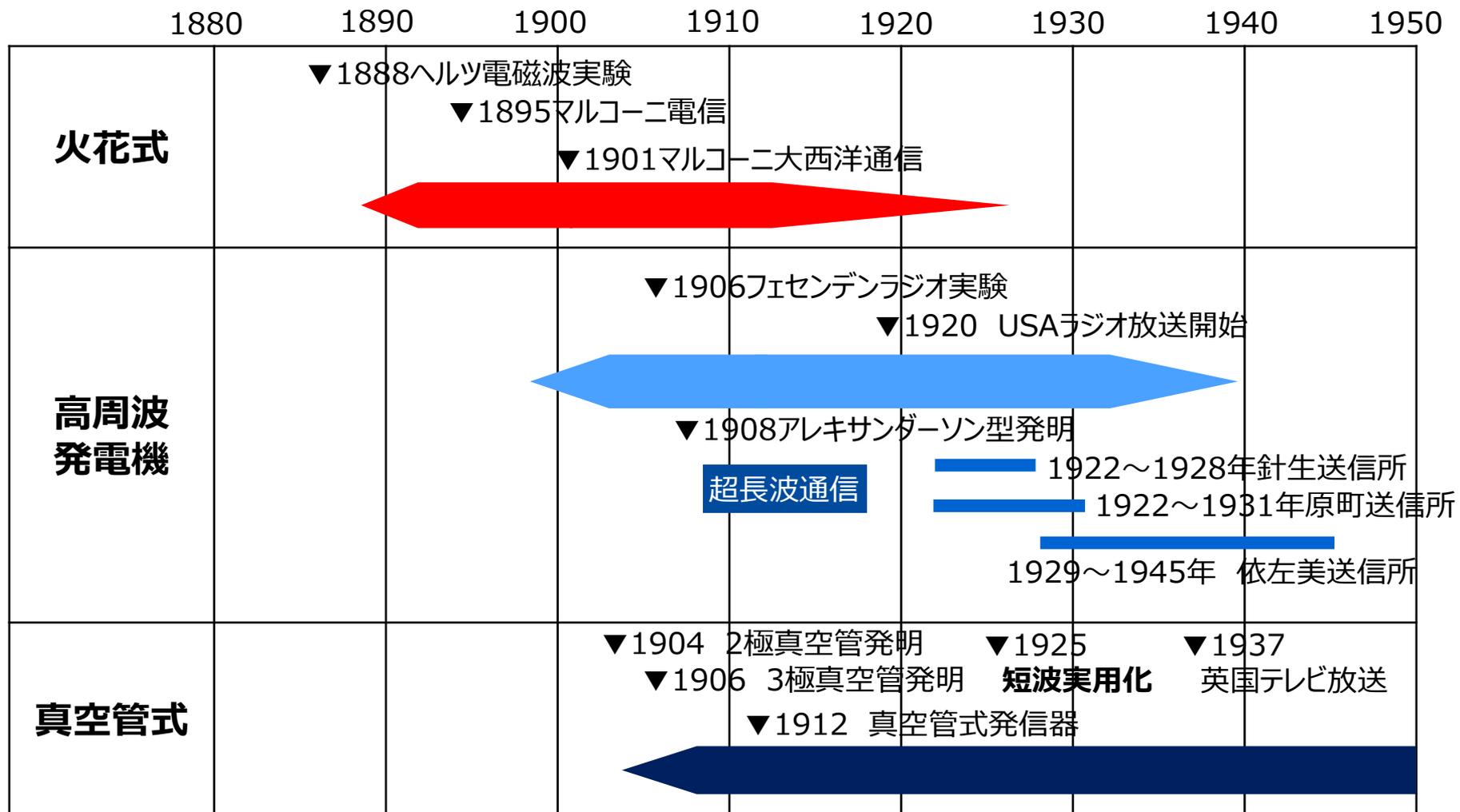
# 通信の原理



# 通信史における高周波発電機式通信装置の位置付け

- 第一次大戦後、通信量増加や通信時間短縮の必要から、海底ケーブル方式に代わる無線方式が採用されるようになった。
  - 初期の火花式送信機やアーク放電を応用した電弧式送信機は、信号が減衰したり、ノイズが大きい等の欠点があり、ノイズの無い信号を連続して送信できる装置が求められた。
  - 電波は周波数が高くなるほど光のように直進する。そのため、円い地球上の遠距離送信には、波長が長く地表を這うように伝わる超長波（波長：10km～100km, 周波数：3kHz～30kHz）が有効であると考えられた。
  - 1910年頃より高周波発電機を高周波源として用いた大電力長波送信機が開発され、実用化された。主な高周波発電機の型式を以下に示す。
    - ・アレキサンダーソン型（米国）
    - ・テレフケン型（ドイツ）
    - ・ゴールドシュミット型（ドイツ）
    - ・ペテノー・ラツール型（フランス）
- ※ 通信周波数としては低周波に属するが、発電機としては一般的な電力50/60Hzより高周波であるため、高周波発電機と称される。
- その後、短波が電離層反射により遠距離送信可能であることが判明したことと、大電力送信用真空管の実用化により、1920年台後半以降超長波送信は短波送信に置き換えられることとなった。

# 発信器から見た通信史



▼1837 テレグラフ

▼1878 電話商業化

▼1947

接合トランジスタ発明  
ショックレー

# アレキサンダーソン型高周波発電機とは

- 米国GE社の技術者アレキサンダーソン氏が、フェツセンデン氏の考案した誘導子形発電機に改良を加え、1908年製作に成功した。
- 1918年に長距離送信機として200kW機を米海軍New Brunswickに納入。
- その後民生用として、同200kW機がRCA（Radio Corporation of America）の米国や欧州の無線局に導入され大陸間通信に使用された。
- GE製200kW機は合計18台製作されたが、現在世界で2台が保存されている。

## ① スウェーデン, Grimeton無線局

無線通信設備一式が保存されており、ユネスコ世界遺産に指定されている。アレキサンダーソン高周波発電機も稼動可能な状態で保存されており、現在も毎年送信イベントで運転されている。

[Grimeton Radio Station Webサイト参照](#)

## ② 米国, スミソニアン博物館

収蔵庫に保管されており、展示計画はない。

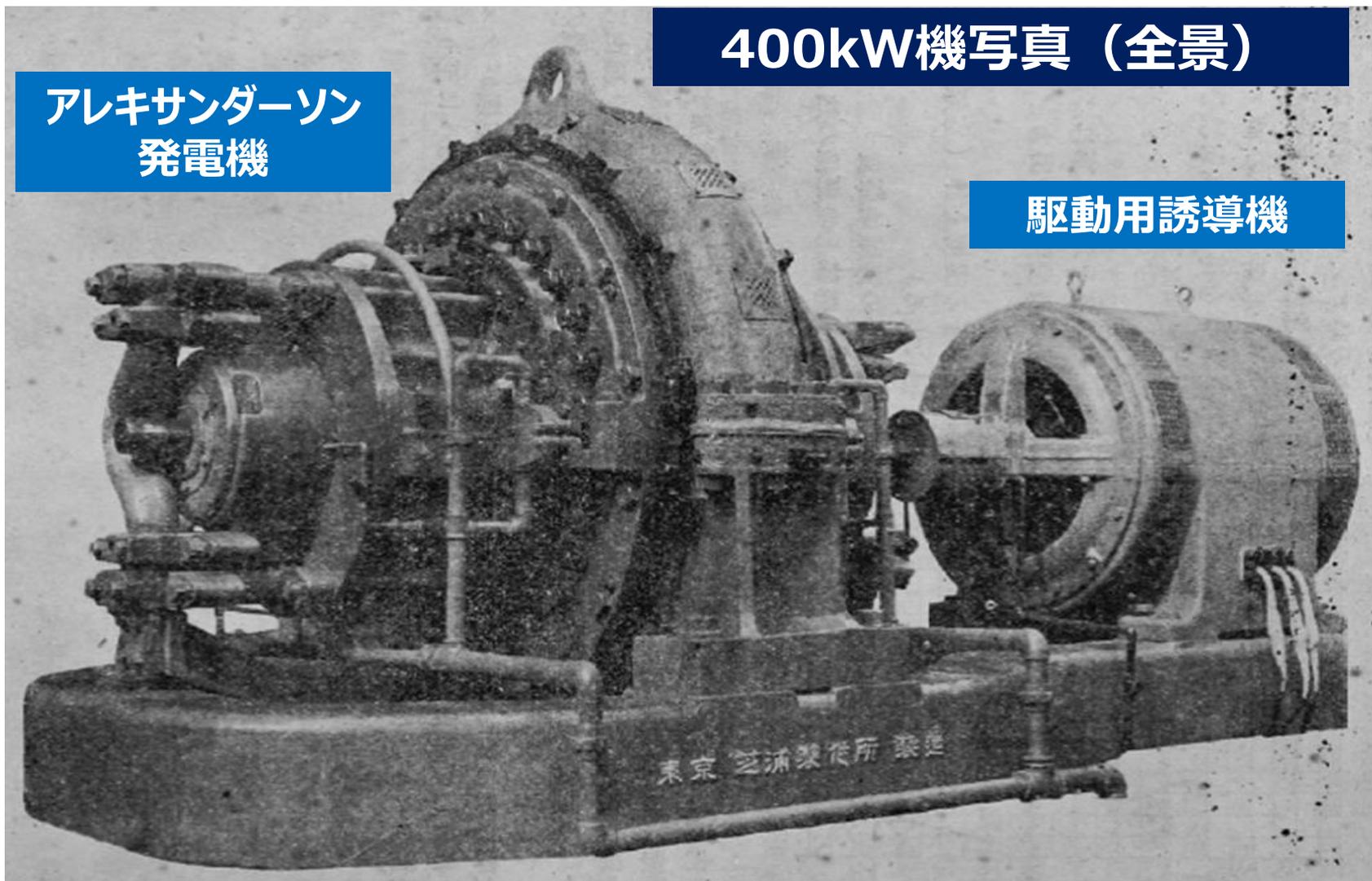
- GE機以外に実用に供されたアレキサンダーソン型高周波発電機は、芝浦製作所製以外には知られていない。

# アレキサンダーソン型高周波発電機の構造 1/5

## 400kW機写真（全景）

アレキサンダーソン  
発電機

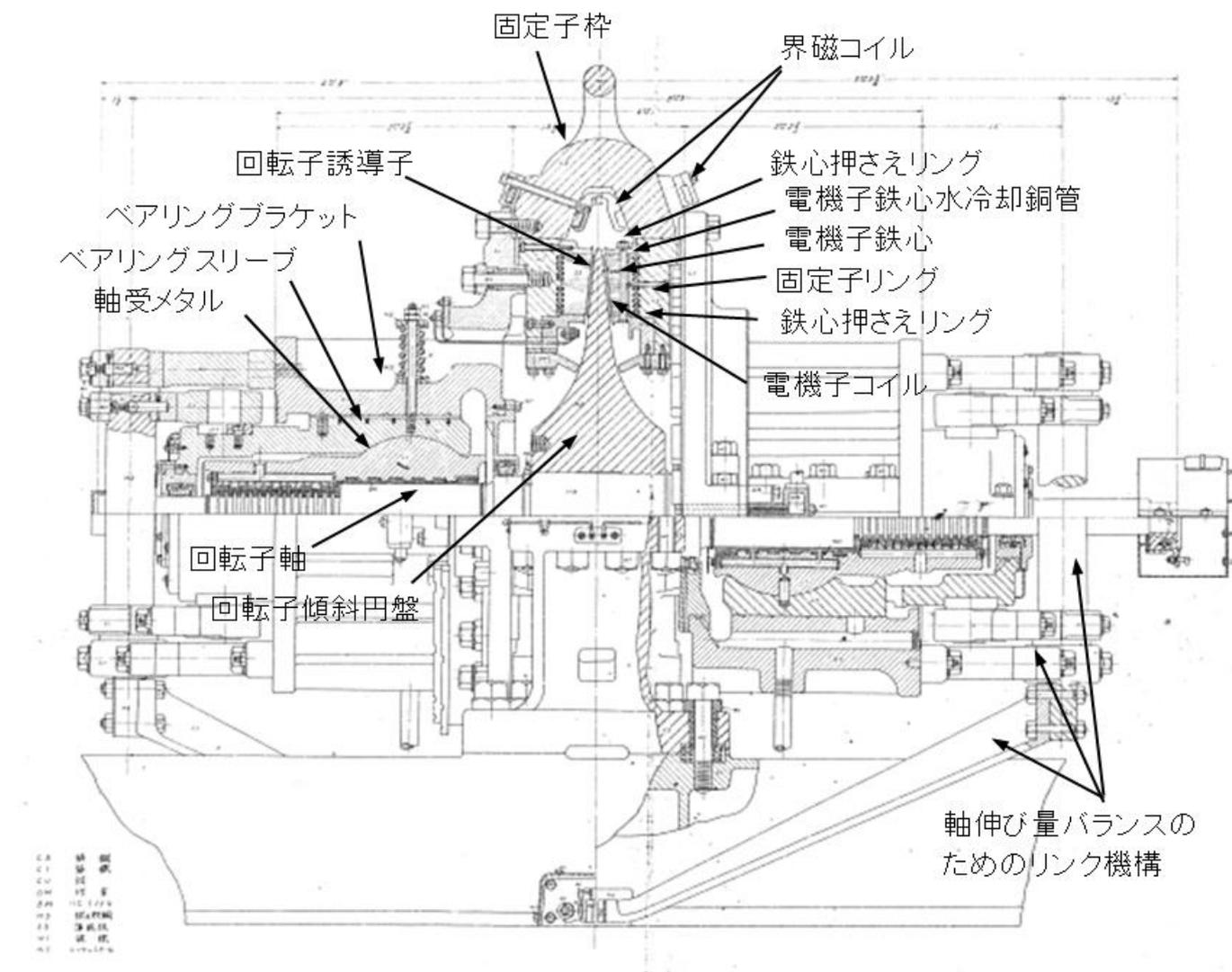
駆動用誘導機



400kW機写真（全景）

出典：大正10年9月電気学会雑誌第398号P632

## アレキサンダーソン型高周波発電機の構造 2/5



全体断面図

# アレキサンダーソン型高周波発電機の構造 3/5

**特徴：誘導子形，アキシャルギャップタイプ**

⇒ **多極化，高回転化が可能**

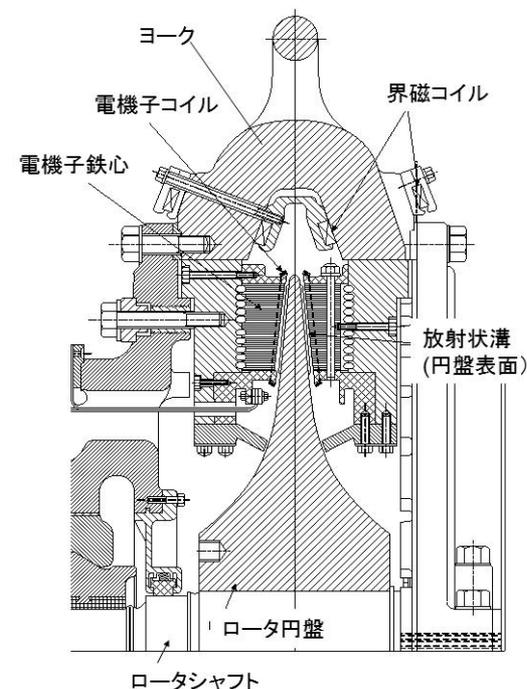
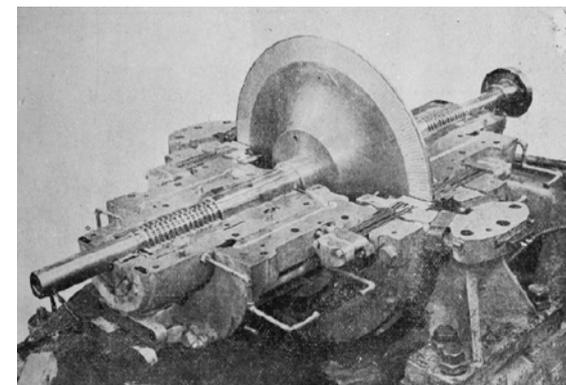
## ■ 誘導子形：Inductor Type

回転するロータ円盤の溝により，磁気回路上の磁気抵抗が変化し，電機子コイルに鎖交する磁束量が変化し高周波の誘起電力が発生する

**周波数 = 回転数 × ロータ円盤溝数 (極数/2)**

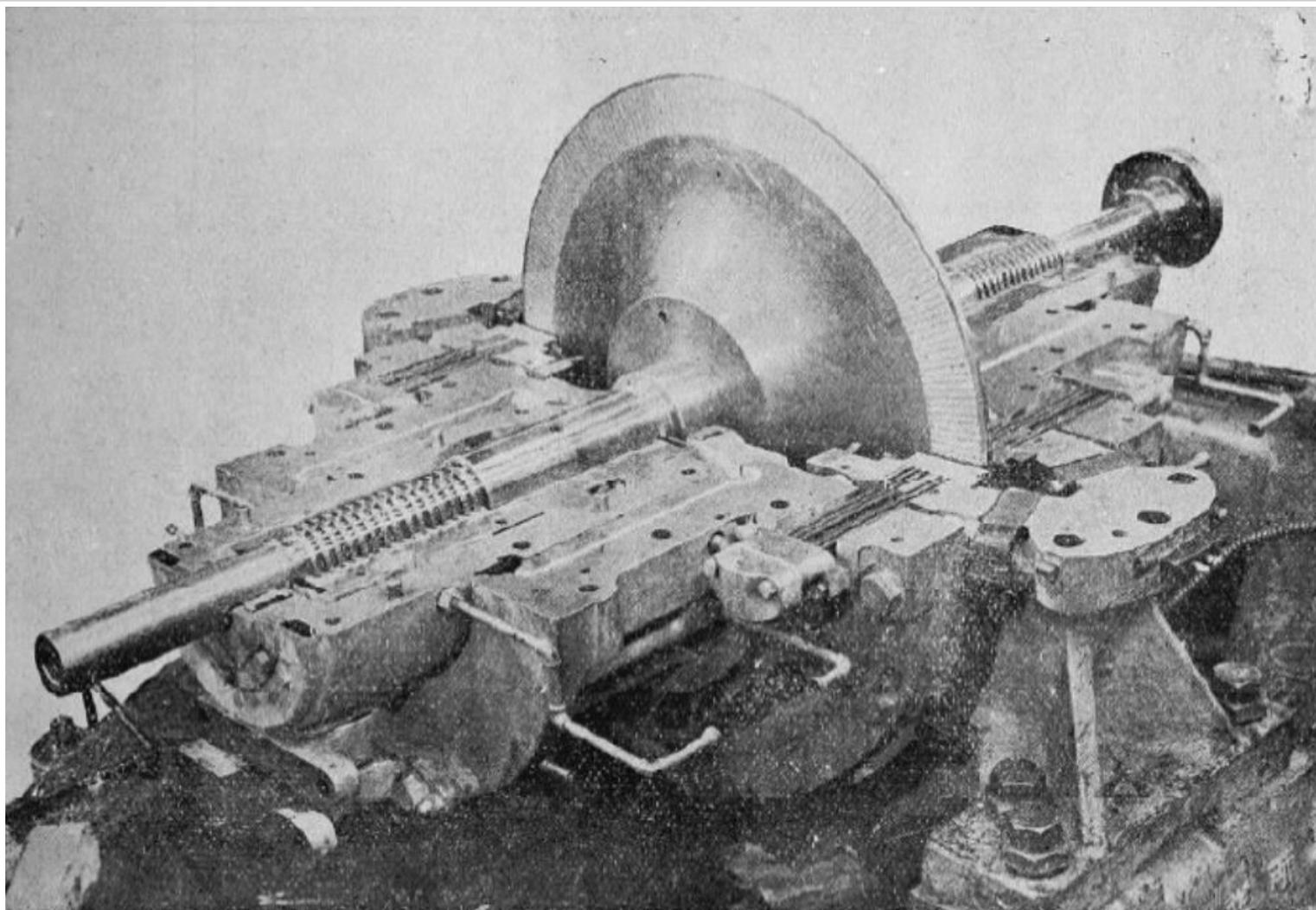
## ■ アキシャルギャップタイプ

- ロータは円盤形状
- ロータ円盤の両面（平面部）と電機子に対向する
- ロータ円盤の両面の平面に放射状に溝を掘り，磁極を形成する
- 電機子コイルは，電機子鉄心に放射状に配置
- 界磁コイルは，両側の電機子鉄心を外周で結ぶヨーク部に設けられており，直流励磁される



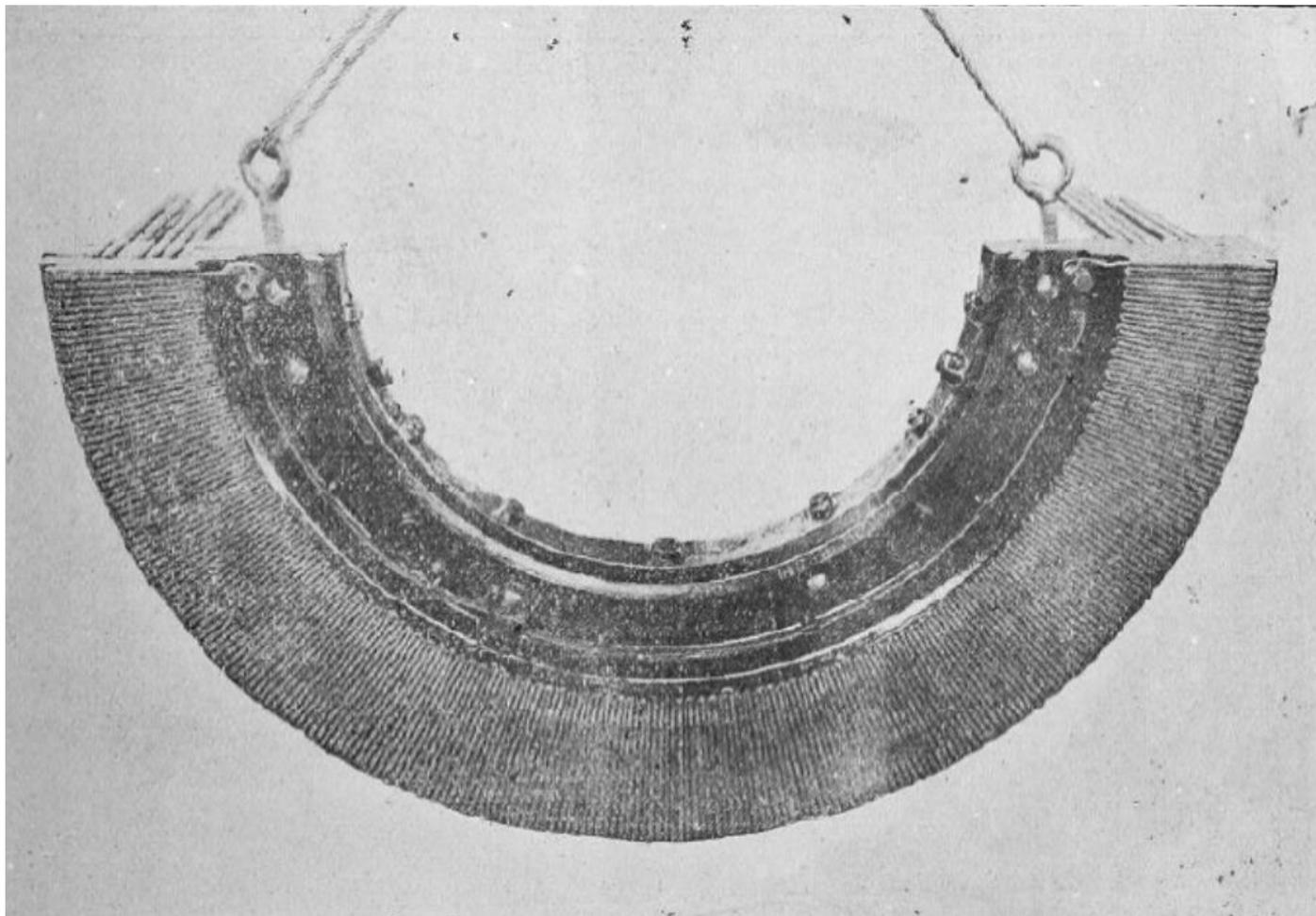
**電機子まわり断面図**

# アレキサンダーソン型高周波発電機の構造 4/5



**400kW機写真（ロータおよび軸受部構造）** 出典：大正10年9月電気学会雑誌第398号P633

# アレキサンダーソン型高周波発電機の構造 5/5



**400kW機写真（電機子鉄心・コイル構造）**

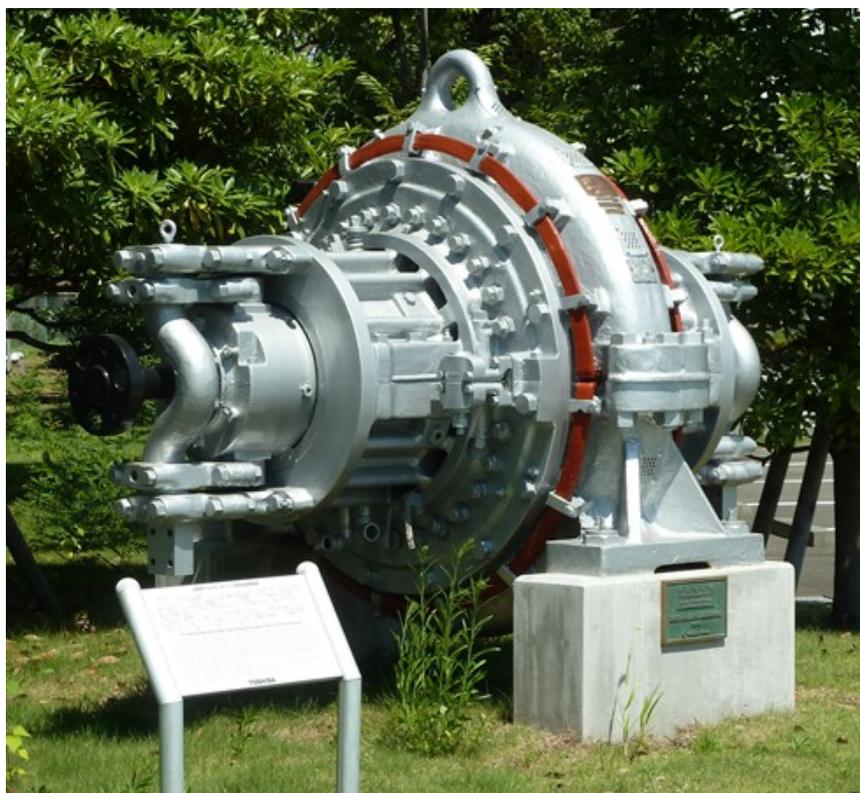
出典：大正10年9月電気学会雑誌第398号P633

# 02

## 125kVA高周波発電機紹介

# 125kVAアレキサンダーソン型高周波発電機

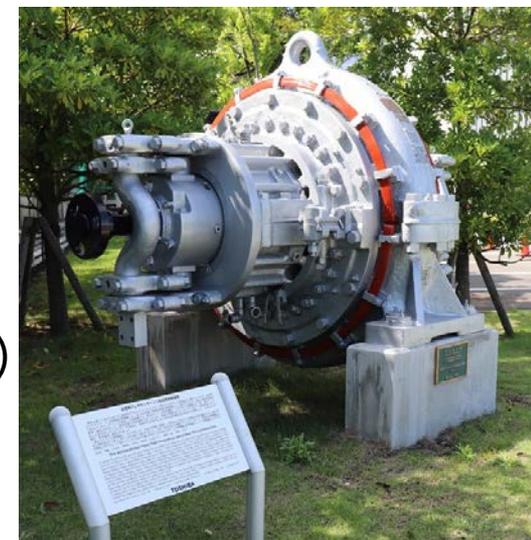
- 設計・製造 : 芝浦製作所
- 製造年 : 大正9年（1920年）製造（完成は大正10年，1921年）
- 定格 : 125kVA-480極-3000rpm-400V-312A-12000Hz
- 佐世保無線電信所（針尾送信所）に送信機の一部として配備
- 第12回「でんきの礎」顕彰（2019年3月）



東芝エネルギーシステムズ  
京浜事業所（横浜市鶴見区）  
2019年7月撮影

# 125kVA アレキサンダーソン型高周波発電機の履歴

- 大正8年（1919年）：日本海軍より受注
- 大正10年（1921年）：完成。3倍周波数逡倍（ていばい）器と組み合わせられて100kW-30kHzの海軍十年式甲号送信機として採用
- 大正11年（1922年）：日本海軍佐世保無線電信所（針尾送信所）に送信機の主装置として配備された。
- 昭和3年（1928年）：針尾送信所の大改装工事により撤去され、真空管式送信機に置き換えられた。
- 昭和3年～昭和19年（1928年～1944年）：不明
- 昭和19年（1944年）：三菱重工名古屋発動機製作所より鶴見工場に修理のため搬入されたが詳細不明
- 平成25年（2013年）まで：京浜事業所（旧鶴見工場）にて屋外に展示
- 平成26年（2014年）：新館建設に伴い倉庫に移動
- 令和元年（2019年）：屋外展示再開





# 03

## 芝浦製作所における開発製造

## 芝浦製作所における高周波発電機の製作 (1/2)

- 芝浦製作所は当時米国GE社と提携関係にあったが、アレキサンダーソン型高周波発電機の開発においては、軍事技術の観点より製作図等の図書は一切入手できず、独自に開発を進めた。
- 合計5台のアレキサンダーソン型高周波発電機を製作したが、125kVA機はその1台目。本機は、並行して開発されていた世界最大容量である400kW機の先行検証機としての位置付けもあった。

# 芝浦製作所における高周波発電機の製作 (2/2)

容量 (周波数)	製作 台数	概要
125kVA (10kHz)	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大正8年（1919年）6月，日本海軍より受注。</li> <li>・大正10年1月（1921年），完成。</li> <li>・大正11年（1922年）～昭和3年（1928年），日本海軍佐世保無線電信所（針尾送信所）にて使用された。</li> <li>・1台は関東大震災（大正12年，1923年）で焼失。</li> </ul>
400kW (20kHz)	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大正8年（1919年）10月，逓信省より受注。</li> <li>・大正10年5月（1921年），完成。</li> <li>・大正11年（1922年），磐城無線電信所原町送信所に設置され昭和7年まで対米通信（ハワイ中継）に使用された。</li> <li>・昭和19年（1944年）中島航空機製造（株）三鷹工場に譲渡され金属表面焼入れに使用。その後の消息不明。</li> </ul>
500kW (20kHz)	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大正12年（1923年）完成。</li> <li>・北京郊外の中華民国海軍部双橋（そうきょう）無線電信局に2台設置。</li> <li>・対欧，対米，対日通信用として良好な性能を見たが，諸般の事情で開局には至らなかった。その後の消息不明</li> </ul>

# 芝浦製作所製発電機の特徴 1/6

- 芝浦製作所におけるアレキサンダーソン型高周波発電機的设计，製造にかかわる技術課題に関しては，以下の文献にその詳細が記されている。
  - 丸山彦門 「アレキサンダーソン型特別高周波発電機の構造概略」 電気学会雑誌第三百九十八号 P625 大正10年9月
  - 丸山彦門 「アレキサンダーソン型特別高周波発電機の構造概略」(大正10年9月29日東京支部講演に関する補足並びに質疑討論) P391 大正11年5月
- その中で「アレキサンダーソン発電機の出力を制限するもの」として以下を挙げている
  - ・回転子の温度上昇（高速回転による風損）
  - ・回転子の機械的強度
  - ・固定子コイル（電機子コイル）の温度上昇
- 上記課題克服のために，設計，材料，ワークマンシップの各分野で損失低減，冷却強化や強度を含めた機械構造の検討がなされている。上記文献から具体的な技術内容を以下に要約して紹介する。

## 芝浦製作所製発電機の特徴 2/6

### 損失低減

- 鉄心抜き板は3ミル=0.08mm, 幅90mm, 長さ9m~12mの極薄珪素鋼板を国内にて開発。表面を高温に耐えられるワニス処理を施し, 高周波の渦電流による鉄損を低減。材料開発に当たっては, 成分調整, 最適な圧延と焼鈍条件を見出すことにより, しわの防止, 電機抵抗値やヒステリシス損等の電気特性を改善した。
- 電機子鉄心スロット内の電機子コイルの絶縁物をできるだけ薄くし, 銅の占積率を増やして電気損を低減した。
- 電機子コイル内の交流損失を低減するため, 125kVA機の場合絶縁したφ0.31mmの細線を57本拗り合せて圧縮成型した導体 (リッツ線) を採用した。
- 電機子コイルの循環電流損失を低減するため, スロット内の上下の電機子コイルはトランスポジションを行っている。
- 円盤表面の溝部に非磁性鋼を充填し, かつ表面を滑らかな鏡面状に仕上げ風損の低減した。円盤材と同等の硬さを有する非磁性鋼を選定することにより, 仕上げ後の境界部の平滑度を向上させた。

## 芝浦製作所製発電機の特徴 3/6

### 冷却強化

- 電機子コイルの主絶縁の方式は、綿テープを巻いたコイルをスロット内に納めた後に含浸処理を行う全含浸絶縁を採用し、銅線から鉄心への熱伝導性を向上させた。  
(通常発電機の絶縁に用いられるマイカは、熱伝導性が悪いため敢えて選択しなかった)  
400kW機の絶縁耐力は130°C1500V, 80°Cで2200Vと定格500Vに対し十分余裕があった。
- 鉄心背部に水冷銅管を配し鉄心の冷却を強化した。

# 芝浦製作所製発電機の特徴 4/6

## 機械強度，構造，他 (1/2)

- ロータ円盤には高強度のNi合金鋼を使用。当時タービン発電機の最大ロータ径が650mm級であった中で，材料メーカーの鑄隗製造能力も考慮しながら内径側の厚さを増して高速回転時の遠心応力を低減して大径化を実現。

(円盤材料強度は，引っ張り強さ = 675MPa，耐力 = 392MPa)

発電機	ロータ外径	回転数	ロータ外径周速
125kVA機 高周波発電機	1244.6mm (49")	3000rpm	700km/h
400kW機 高周波発電機	1549.4mm (61")	3600rpm	1050km/h
GE社200kW機 高周波発電機	1625.6mm (64")	1605～2872rpm	490～880km/h
当時のタービン発電機	約650mm	3600rpm	440km/h

## 芝浦製作所製発電機の特徴 5/6

### 機械強度，構造，他 (2/2)

- ロータ円盤溝部に充填する非磁性鋼部材の固定構造は，高遠心力に耐えられる構造を考案した。
- 軸受は球面座を設け，シャフトの撓みに追従できるように配慮した。
- 軸受のホワイトメタル中に銅管を鋳込み，冷却水を通水して冷却した。
- ロータ円盤と固定子鉄心の間隙は，125kVA機の場合0.5mm(断面図より)シャフトの熱伸び時にも円盤両面の間隙を常に均等に保持させるために，ラジアル軸受，スラスト軸受を納めたスリーブが，軸方向にスライド可能な構造となっており，かつスリーブはスプリングと左右双方のスリーブを接続する特殊なリンク機構を有する。
- 万が一電力供給が絶たれた場合でも給水，給油が保たれるように，バッテリー駆動の直流電動機による予備ポンプを有すると共に，圧力油槽も設置した。

## 芝浦製作所製発電機の特徴 6/6

### 製造技術，ワークマンシップ

- 鉄心抜き板の加工はパンチングではなく、一定厚さ重ねた抜き板を2枚の黄銅板で挟み込み、切削加工で製作した。バイトの切れが悪いとバリにより抜き板間短絡が生じる可能性がある。バリを除去する薬品を開発し、加工後に薬品処理をして抜き板間短絡のリスクを排除した。
- ロータ円盤はキーレス構造で、シャフトに焼き嵌めた後熱処理を行い残留応力を除去し、振動の原因を排除した。
- 125kVA機ではロータ円盤表面には長さ103mm、幅内径側10.6mm、外径側13mmの扇状の半径溝を円周上等配に240本ずつ加工している。これを位置出し治工具（高精度加工された歯車）を用いることにより精度良く加工した。
- 上記軸曲がり防止の配慮や高精度の機械加工の結果、特にバランス調整することなく低振動で運転することができた。
- ロータ円盤溝部には非磁性材を組み込んだ上で、磁性材（円盤材料）との境目を含め全体を鏡面状に滑らかに仕上げ、風損の最小化を図った。

# 芝浦製作所製とGE製発電機の諸元比較

	佐世保無線電信所 (針尾送信所)	磐城無線電信局 原町送信所	中華民国海軍部 双橋無線電信局	GE機
製作者	芝浦製作所	芝浦製作所	芝浦製作所	GE
設置年	1922年	1922年	1923年	1918～1924年
出力	125kVA	(400kVA)	(500kVA)	—
	100kW	400kW	500kW	200kW
電圧	400V	500V	500V	—
周波数	12000Hz	19700Hz	20000Hz	10325～29189Hz
電流	312A	800A	1000A	—
極数(片側溝数×2)	480	666	666	772/976/1220
回転子直径	1244.6mm (49")	1549.4mm (61")	1549.4 (61")	1625.6mm (64")
回転数 (運転速度)	3000rpm(2500rpm)	3600rpm	3600rpm	1605～2872rpm
送信周波数	10000Hz × 3 = 30000Hz	19700Hz	20000Hz	10325～29189Hz
効率	—	70%	—	<50%
発電機重量	—	20ton	20ton	—
全体重量 (発電機+原動機+ベース)	—	31ton	31ton	50ton
駆動装置	直流電動機	誘導電動機	蒸気タービン	誘導電動機+増速ギア



## 高周波発電機開発の困難さ

400kW機の完成直後となる大正10年7月に芝浦製作所が残した図書「400キロワット特別高周波電動発電機の説明」の文末には、開発の困難さについて記述がある。この内容は125kVA機にも当てはまると考えられるので紹介する。

「本機製造に当たりて、時あたかも世界大戦の末期に際し、使用材料の輸入殆ど望みなかり為め機械の全部は皆内地製材料を使用せり。是がため弊所員の苦心実に尋常ならざるものありき。

しかして各部設計及び製作は皆幾多の見本を製造しかつ之を試験してその結果により決定せしものにて、一片いやしくもせざりし苦心と努力とは製作に関与せざりし人々には想像だもなし能（あた）わざる所にして、全機は実に各担当者の努力の結晶と称するも敢えて過言に非ずと信ず」

# 04

まとめ

## 佐世保電信所（針尾送信所）について

- 125kVAアレキサンダーソン高周波発電機式送信機の導入に合わせ、日本海軍は佐世保軍港佐世保電信所（針尾送信所）に超長波通信用アンテナを建設した。（大正11年，1922年完成）
- このアンテナは，1辺300mの正三角形の各頂点に配置された，高さ136mの3本の鉄筋コンクリート製の塔の間に張られた空中線で構成されていた。
- 現在もこの鉄筋コンクリート製の塔は保存されており，重要文化財の認定を受けている。
- 文化遺産オンライン，  
佐世保市教育委員会HP参照



現在の針尾送信所（佐世保市教育委員会提供）

## 国内に現有する他の高周波発電機について

- 愛知県刈谷市の**依佐美（よさみ）送信所**にテレフケン型高周波発電機が展示されている。この高周波発電機は2007年に機械遺産に認定された。（機械学会 機械遺産第10号）また、依佐美送信所は、2008年にIEEEマイルストーンとして認定されている。
  - 発電機仕様：昭和2年（1927年）製造，ドイツAEG社製  
600kW（700kVA）-5814Hz-1400rpm
  - ・詳細は，依佐美送信所HP，文化遺産オンライン参照
  - ・GE製200kWアレキサンダーソン発電機では出力が不足しており，テレフケンの通信システムが選定された，とある。
  
- 東京大学工学部 電気電子工学科 所有  
GE製 2kW-100V-20A-100kHz-20000rpm  
変圧器内高周波異常電圧の研究のため，大正4年（1915年）購入  
本郷キャンパス内，工学部3号館内展示ホールにて公開中

## まとめ

100年も昔の電子計算機や高精度なNC工作機械のない時代に、現在の発電機技術に照らし合わせても遜色の無い、高度かつ広範囲な電気・機械技術を駆使し、かつ短期間で世界一の製品を独自に開発したことは、芝浦製作所のみならず材料メーカ等含むわが国の当時の工業レベルの高さを証明するものです。

通信史の中で高周波発電機式送信機は、技術の変遷によりその貢献期間は10数年と比較的短期間ではありましたが、第一世界大戦後の激動する世界の中で、需要の増した海外長距離通信を支えた重要な技術でありました。

現存する発電機は、世界最大容量機そのものではありませんが、国産第一号機であり、かつ世界最大容量機の実現に大きな役割を果たした発電機です。

文献からは、開発に携わった技術者の技術に対する真摯な姿勢がうかがわれ、その成果としての本発電機は、将来の若い技術者にも伝承していくべき産業遺産としてふさわしい機械であると考えます。

# TOSHIBA

ご清聴ありがとうございました