新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

# 現状の電気飛行機と電気自動車用モータ性能を大幅に超える高出力密度で高効率のモータ

東洋大学　理工学部　電気電子情報学科
教授　堺　和人

2023年8月29日

# 新技術：2重給電の磁界共振結合モータ・発電機システム

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

◇科学技術分野：
　電気機器（モータ・発電機），パワーエレクトロニクス（インバータ）

◇社会実装（応用）：
　電気飛行機（空飛ぶ車・無人飛行機・電動航空機），
　電気自動車，鉄道，風力発電

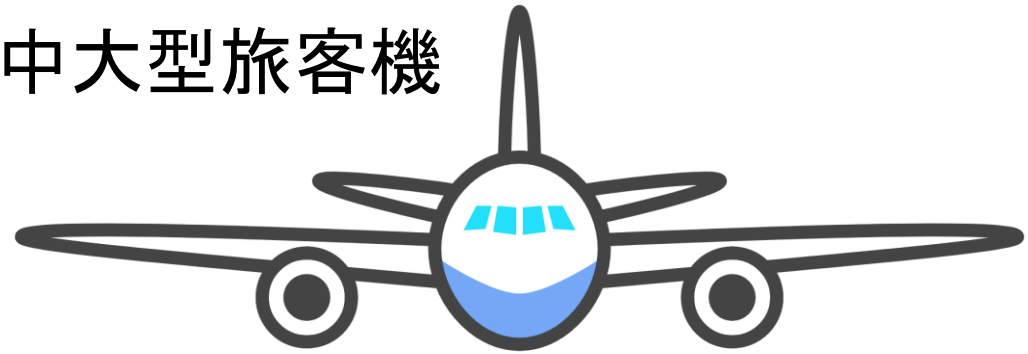
◇特許の目的と効果
　移動体システム，風力発電等の要求
　　→回転速度を広範囲に可変して省エネルギーで運転
　特に移動体やモバイル機器
　　→重量当たりの出力が最も重要

　○発明技術の目的
　　10 ～20 kW/kg の高出力密度のモータ・発電機システムを得る
　　・現状市販の電気自動車・ハイブリッド自動車：1～2 kW/kg
　　・日本国家PJ：8 kW/kg，電動航空機（欧米）10～20 kW/kg
　　（出力密度：モータ・発電機の出力／重量）

# これからは、「高出力密度」がなぜ重要か

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

・完全電気推進小型機・ハイブリッド中大型旅客機
・空飛ぶ自動車
・宅配ドローン



電動航空機の実用化
重量当たりの出力密度：10kW/kg 以上

**高出力密度**

① 高速回転化
例：現状の2倍の 40,000 rpm によって出力密度2倍

② モータと発電機のエネルギー変換を倍増

高速回転による大幅な小型化(省資源)

世界規模の電気自動車への転換
永久磁石のみでなく、電磁鋼板、銅も世界で不足

# 飛躍的な高出力密度にするには？

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

出力密度

モータの出力$P = N \times B_g \times ac \times$体積

($N$:回転速度，$B_g$:磁束密度，$ac$:周長当たりのアンペアコンダクタ)

出力密度$P_d = N \times B_g \times ac$

$\fallingdotseq$回転速度×磁力の密度×電流密度

＝①の技術×②の技術

# 飛躍的な高出力密度:①高速回転

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

高速回転化の課題

◆回転子の機械強度

金属(磁性材):高強度の電磁鋼板，高強度合金

非金属(非磁性材):強化繊維樹脂C-FRP，G-FRP

C-FRP ＞ G-FRP ≫ 高強度磁性金属

◆鉄損(磁気的損失)

磁気的損失は回転数の2乗に比例して急激に増加

磁気的損失$\propto N^2$

遠心力に対する機械強度と高周波における損失

⇨ 大出力で高速化が困難

# 飛躍的な高出力密度：①高速回転

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

## ①大出力で高速回転を可能にするには？

- 機械強度の問題に関しては，

  解決策：高強度で超軽量のC-FRP（非磁性材）

  → C-FRPの非磁性材に伴う課題：出力は大幅に低下

- 非磁性材適用に対する出力確保の問題に関しては，

  更なる解決策：磁界共振結合

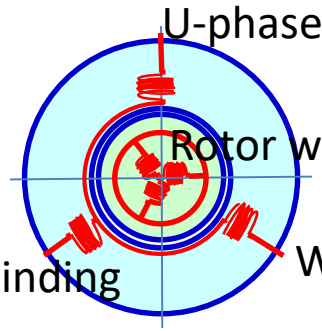
  2つのコイルが離れた空間において，電力を非接触で伝送

# ①高速回転：　磁界共振結合モータ･発電機

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

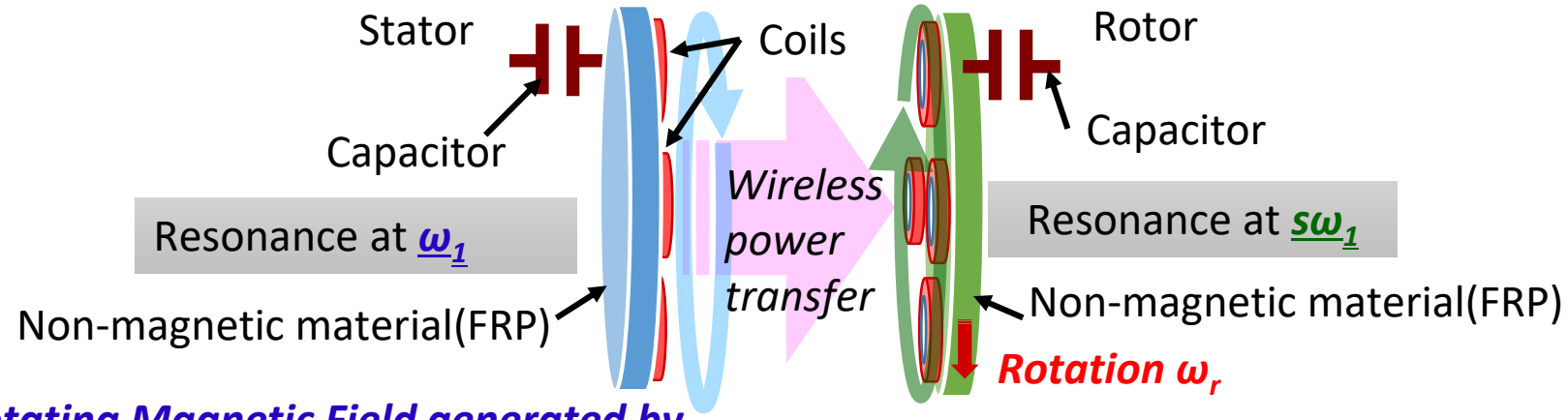
## 新技術：ワイヤレス電力伝送原理＋誘導モータの誘導作用の回転磁界

＋




ワイヤレス電力伝送 *(1)　＋　誘導モータ

固定子の回転磁界と回転子の回転磁界が共振結合

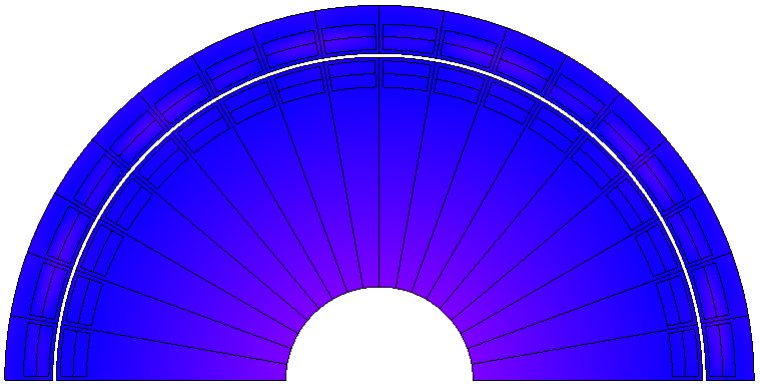



＊（1）Experiment of wireless power transfer by MIT,. Science　Express, 2007

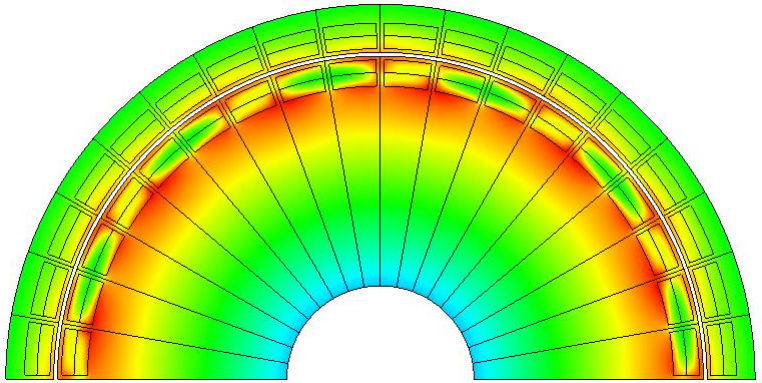
# ①高速回転：　磁界共振結合モータ･発電機

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

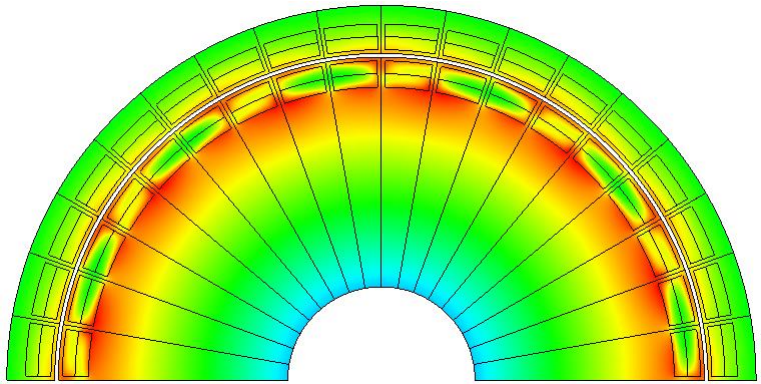
## 磁界共振結合によるモータ内の磁力の増強



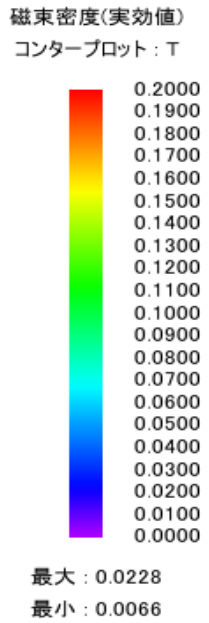
360Hz
非共振状態



1kHz (Resonant state in both stator and rotor)
共振状態



1kHz (Resonant state in only rotor)




Resonant frequency：1kHz

Current density of stator windings:10A/mm$^2$

# ①高速回転：　磁界共振結合モータ・発電機

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

さらに，大きなメリット：
無鉄心（エアコア）で構成するので磁気的損失はゼロ

| Item | 2poles | | 4poles | | 8poles | | 12poles | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Primary frequency (Power source: f (Hz)) | 1750 | 1750 | 3460 | 3460 | 6920 | 6920 | 10510 | 10770 |
| Secondary frequency (slip frequency : sf (Hz)) | 83.33 | 83.33 | 126.6 | 126.6 | 253.3 | 253.3 | 510 | 770 |
| Slip: s | 0.0476 | 0.0476 | 0.0366 | 0.0366 | 0.0366 | 0.0366 | 0.0485 | 0.0715 |
| Input voltage (V) | 505 | 1214 | 511 | 1228 | 410 | 987 | 261 | 956 |
| Primary current (A) | 17 | 40.8 | 17 | 40.8 | 17 | 40.8 | 17 | 40.8 |
| Current density of primary coil ($A/mm^2$) | 10 | 24 | 10 | 24 | 10 | 24 | 10 | 24 |
| Secondary current (A) | 6.08 | 14.6 | 6.4 | 15.4 | 6.45 | 15.5 | 5.99 | 22.2 |
| Torque (Nm) | 2.18 | 12.6 | 2.30 | 13.4 | 1.85 | 10.7 | 1.13 | 10.0 |
| Output power (kW) | 22.8 | 132 | 24.0 | 139 | 19.4 | 112 | 11.8 | 105 |
| Efficiency (%) | 88.8 | 88.8 | 92.5 | 92.5 | 92.9 | 92.9 | 90.6 | 89.8 |

# 飛躍的な高出力密度：②両側給電のモータ

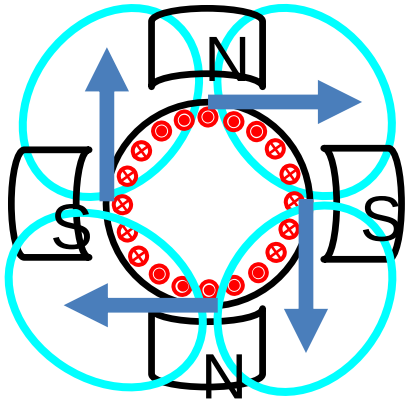
新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

■回転電機の原理と作用

磁界と電流で出力（トルク）を発生するように，固定子と回転子は，それぞれ役割を分担している。

・磁界を作る界磁の役目

・電流が磁界と作用してエネルギー変換する電機子のような役目




固定子側で磁界を形成させ、
回転子側に電流を流すと、接線力が発生

固定子と回転子の役割はそれぞれ一つ
1パターンのみ

飛躍的な高出力密度化にするには：
界磁と電機子の両方の役割を，固定子と回転子とも同時に行う。
固定子と回転子の両方から電気エネルギーの入出力

共に働き：役割分担ではなく助け合い

飛躍的な高出力密度：②両側給電のモータ

# 磁気結合した2つの回転磁界にエネルギー入力

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

## ◆回転機のエネルギー変換を倍増

高出力密度化するには，
界磁と電機子の両方の役割を，固定子と回転子とも同時に行う。
固定子と回転子の両方から電気エネルギーの入出力

**2つの回転磁界の相互作用**で力を発生する。

○固定子側の回転する磁界　(固定子多相巻線に多相交流電流で発生)
○回転子側の回転する磁界　(回転子多相巻線に多相交流電流で発生)

**2つの回転磁界を磁気結合**させ、**回転磁界の位相差**で互いに力が作用し、**位相差の変化で発生力の大きさが増減**する。

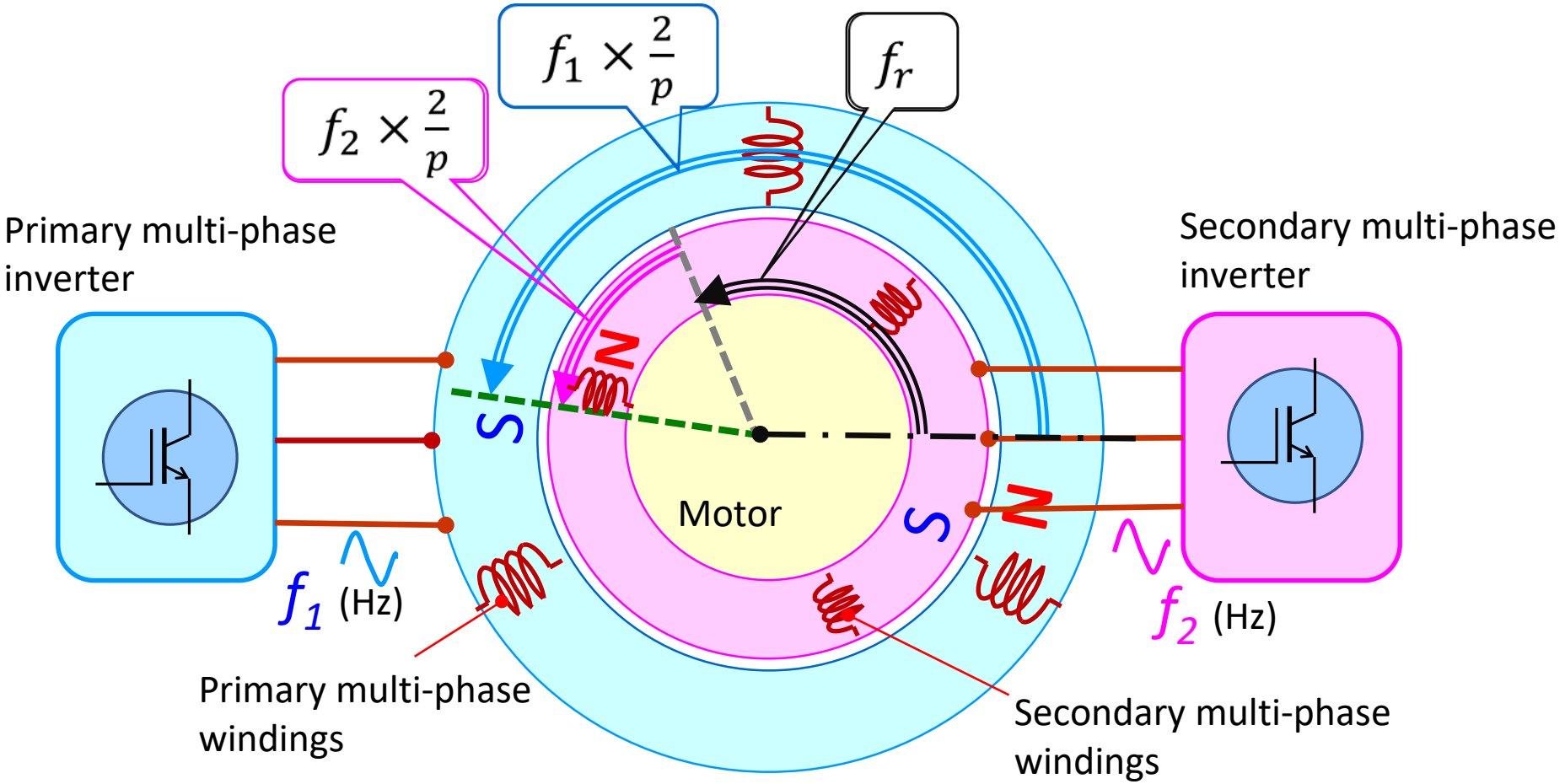
固定子と回転子の両方が磁界を形成、
さらに固定子と回転子の両方がエネルギー変換する電流を流し、それぞれが両方の役割を待つ。

固定子と回転子の**役割はいずれも界磁と電機子の両方の2つ，かつ複数パターン**

両方役割で両方から電気エネルギーの入出力を行う
⇨ 両方エネルギー変換機　　以降、ここでは、両側給電交流機と称す

# 飛躍的な高出力密度:②両側給電のモータ
# 両側給電交流機の基本構成

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!



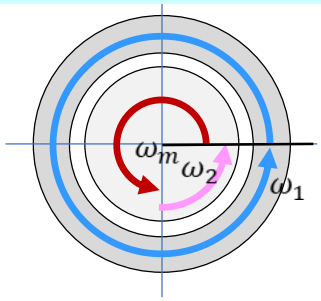

Basic configuration of a doubly fed AC machine

# 2つの回転磁界で相互作用を生じるための速度条件

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

両側給電交流機の動作は、すべりで表現される4つの基本パターンになる。
両側給電のすべりは誘導機のすべりと同じように表されるが，すべる意味ではない。
すべり＝（2次回転磁界の回転速度）／（1次回転磁界の回転速度）

**すべりが正の場合（1より小さい）**



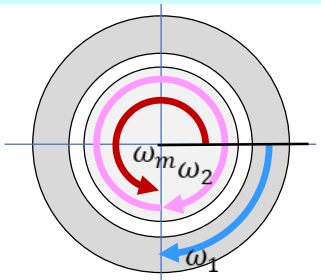

（一般的な）誘導機

① $\omega_m < \omega_1$ ， $\omega_2 < \omega_1$

$\omega_m = \omega_1 - \omega_2$

（回転子の速度＝2次に対する1次の相対速度）

**すべりが正の場合（1より大きい）**

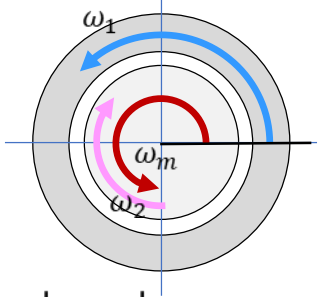



② $|-\omega_1| < |-\omega_2|$ ，

$\omega_m = -\omega_1 + \omega_2$

$(\omega_m = -\omega_1 - (-\omega_2))$

**すべりが負の場合**



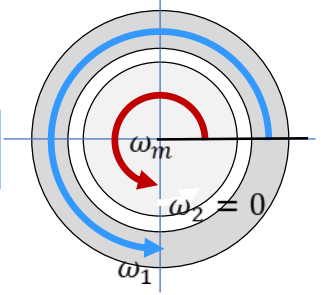

③$\omega_m > \omega_1$ ， $|-\omega_2| < \omega_1$ $or$ $|-\omega_2| > \omega_1$

$\omega_m = \omega_1 + \omega_2$

$(\omega_m = \omega_1 - (-\omega_2))$

**すべりが０の場合**

同期機・誘導機




④ $\omega_m = \omega_1$ ， $\omega_2 = 0$

$\omega_m = \omega_1$

$(\omega_m = \omega_1 - \omega_2 = \omega_1 - 0)$

$\omega_1$：1次多相巻線が作る回転磁界の速度，$\omega_2$：2次多相巻線が作る回転磁界の速度，$\omega_m$：回転子の速度

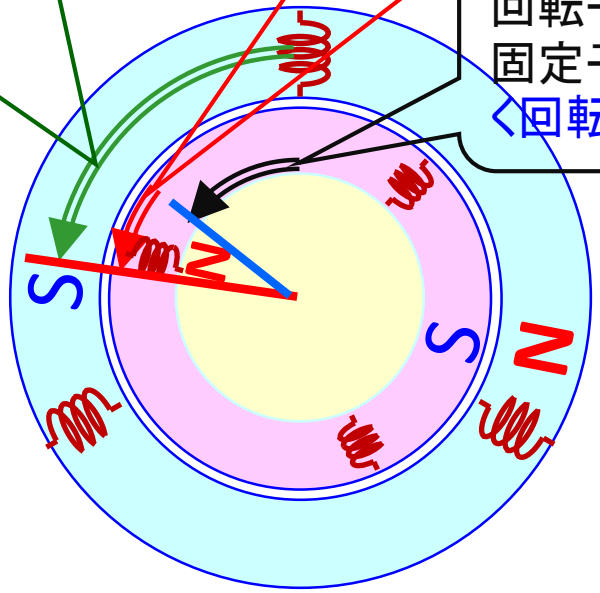
# 飛躍的な高出力密度:②両側給電のモータ
# 同期機として作用を考えると
# 回転子の速度　＜　固定子の回転磁界速度　の駆動

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

固定子の回転磁界の磁極が回転子の磁極を吸引し，回転子の回転磁界が同期して回転する．
この磁気吸引力と反発力で同期機と同様にトルクが発生する

回転子の回転磁界は，回転中の回転子の上に乗って、回転子の上を同方向に回っている

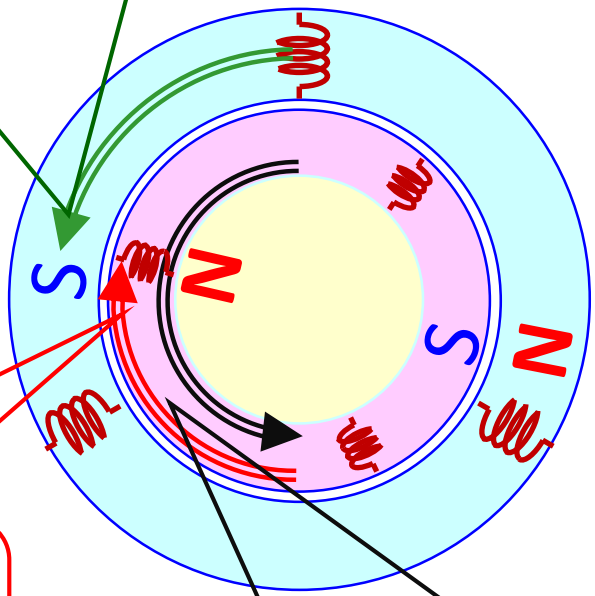
回転子の物体そのものは固定子の回転磁界よりも遅く回転する．



# 飛躍的な高出力密度:②両側給電のモータ
# 同期機として作用を考えると
# 回転子の速度　＞　固定子の回転磁界速度　の駆動

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

固定子の回転磁界の磁極が回転子の磁極を吸引し，
回転子の回転磁界が同期して回転する．
この磁気吸引力と反発力で同期機と同様にトルクが発生する




回転子の回転磁界は，回転中の回転子の上に乗って、回転子の上を逆方向に回っている

回転子の物体そのものは固定子の回転磁界よりも速く回転する．

# 飛躍的な高出力密度:②両側給電のモータ
# 特徴・優位点

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

①出力の倍増 ⇦ 固定子と回転子の両側から電気エネルギーの入出力を行う

②高速化の制約緩和 ⇦ スイッチング周波数とマイコンの処理速度の制約は
2倍に改善(高速回転時の周波数は従来モータの1／2が可能)

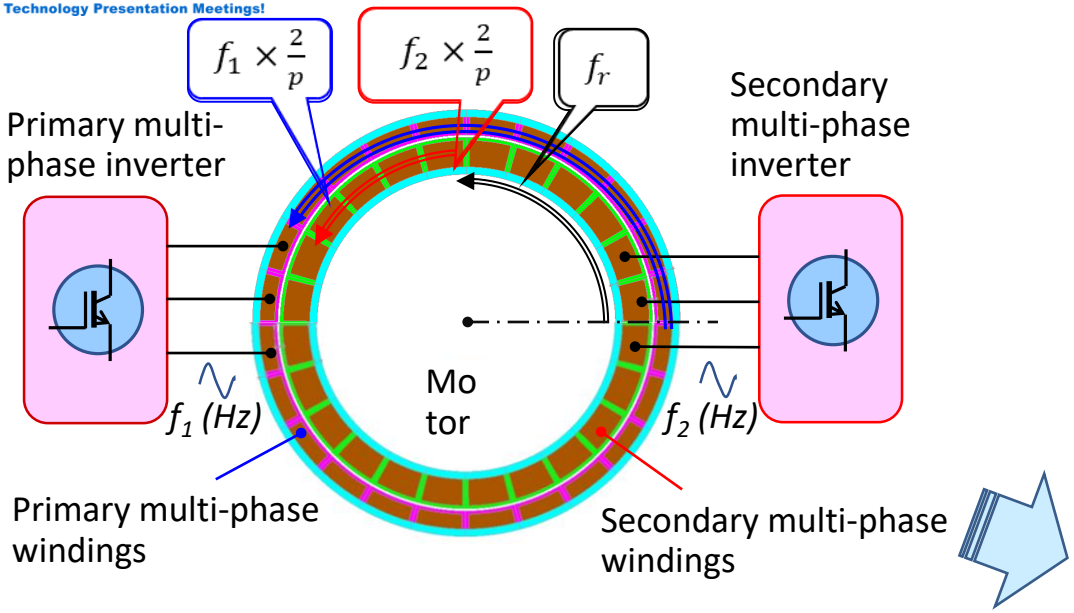
③高性能な運転 ⇦ 下記の7つの制御パラメータによる運転自由度の拡大

固定子**電流の大きさ、周波数**
回転子**電流の大きさ、周波数**
固定子の**回転磁界の方向**
回転子の**回転磁界の方向**
固定子と回転子電流の**電流位相差**

これらのモータの駆動制御においても,
**7個のパラメータの組合せ**で、**従来困難であった運転**や
**新しい効果**が得られる

# 飛躍的な高出力密度:②両側給電のモータ
# 動作検証用の磁界解析のモデル

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!



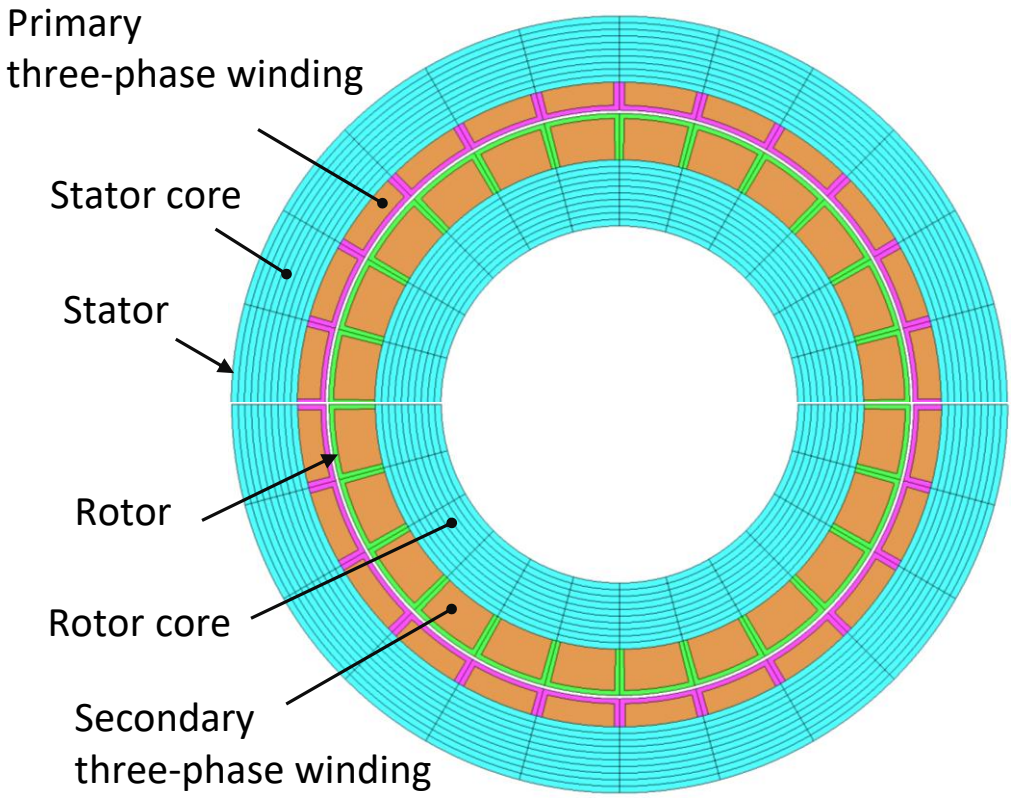



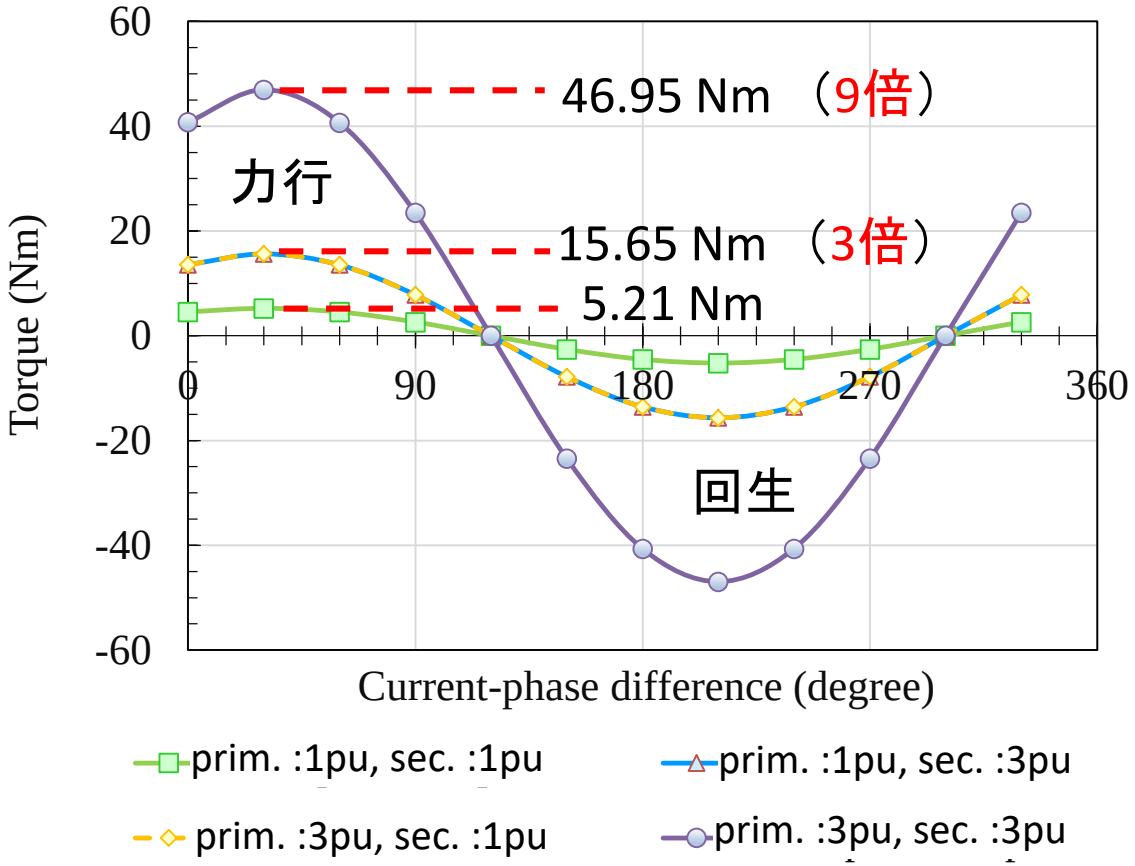

Fig. 1. Analytical model of a doubly-fed AC machine

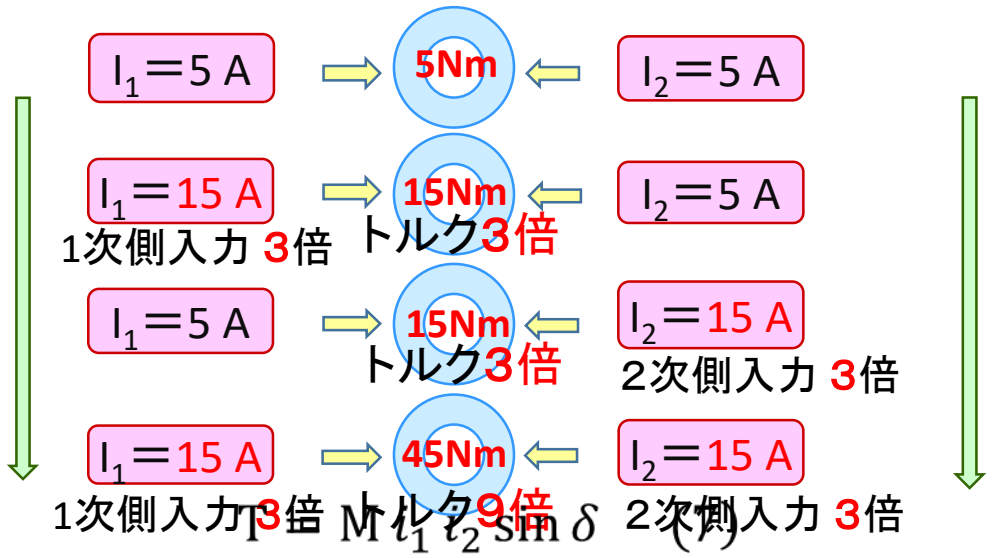
Table 1 Specification of an analytical model of the doubly-fed AC machine

| | Stator | Rotor |
|---|---|---|
| Pole/Phase | 4/3 | |
| Effective length(mm) | 150 | |
| Gap length(mm) | 1 | |
| Outer diameter(mm) | 235 | 176 |
| Magnetic ring thickness(mm) | 20 | 20 |
| Number of turns | 60(/phase) | 56(/phase) |
| Series AT (at 1 pu) | 2448(6.1 A/mm$^2$) | 2448(4.0 A/mm$^2$) |

# 飛躍的な高出力密度:②両側給電のモータ
# 電流位相とトルクの関係・1次と2次の電流とトルク

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!




T: Torque, M: Mutual inductance, $i_1$ : Primary current, $i_2$ : Secondary current, $\delta$ : Current-phase difference (angle between the magnetic pole)

Enhancement of torque by increasing the primary and secondary current of the doubly-fed AC machine

# 両側給電モータのまとめ

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

## 両側給電交流機

◆**2つの回転磁界の相互作用**で力を発生する。
- 固定子側の回転する磁界　(固定子多相巻線に多相交流電流で発生)
- 回転子側の回転する磁界　(回転子多相巻線に多相交流電流で発生)

◆**2つの回転磁界を磁気結合**させ、**回転磁界の位相差**で互いに力が作用し、**位相差の変化で発生力の大きさが増減**する。

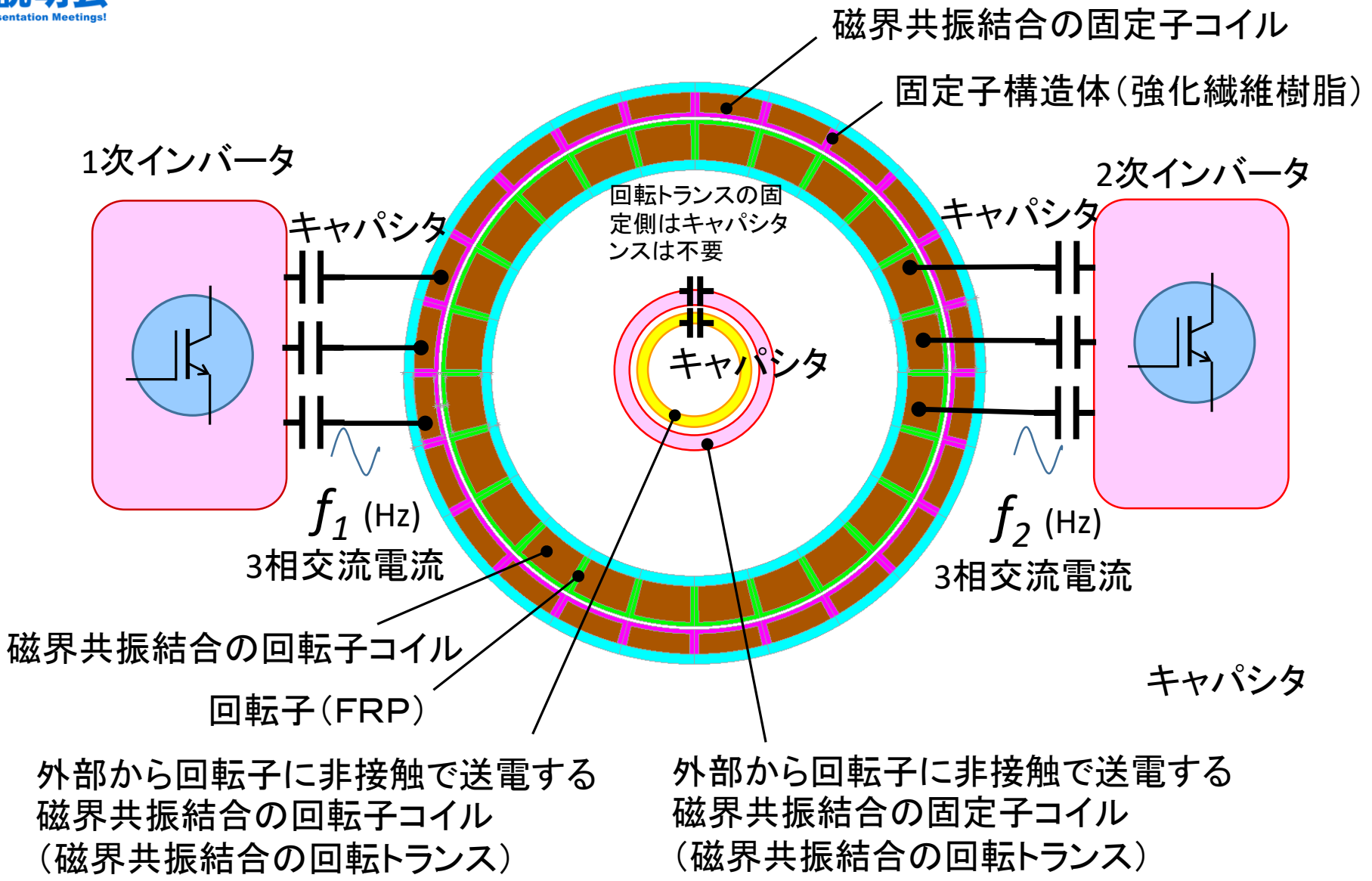
◆固定子と回転子の両側から電気エネルギーの入出力を行うので、出力は倍増できる

◆従来の1／2の周波数で高速回転できる

◆モータの駆動制御に関係する7**個のパラメータの組合せて制御することで**，従来困難であった運転や新しい効果が得られる

# 本発明の2重給電の磁界共振結合モータ･発電機の構成

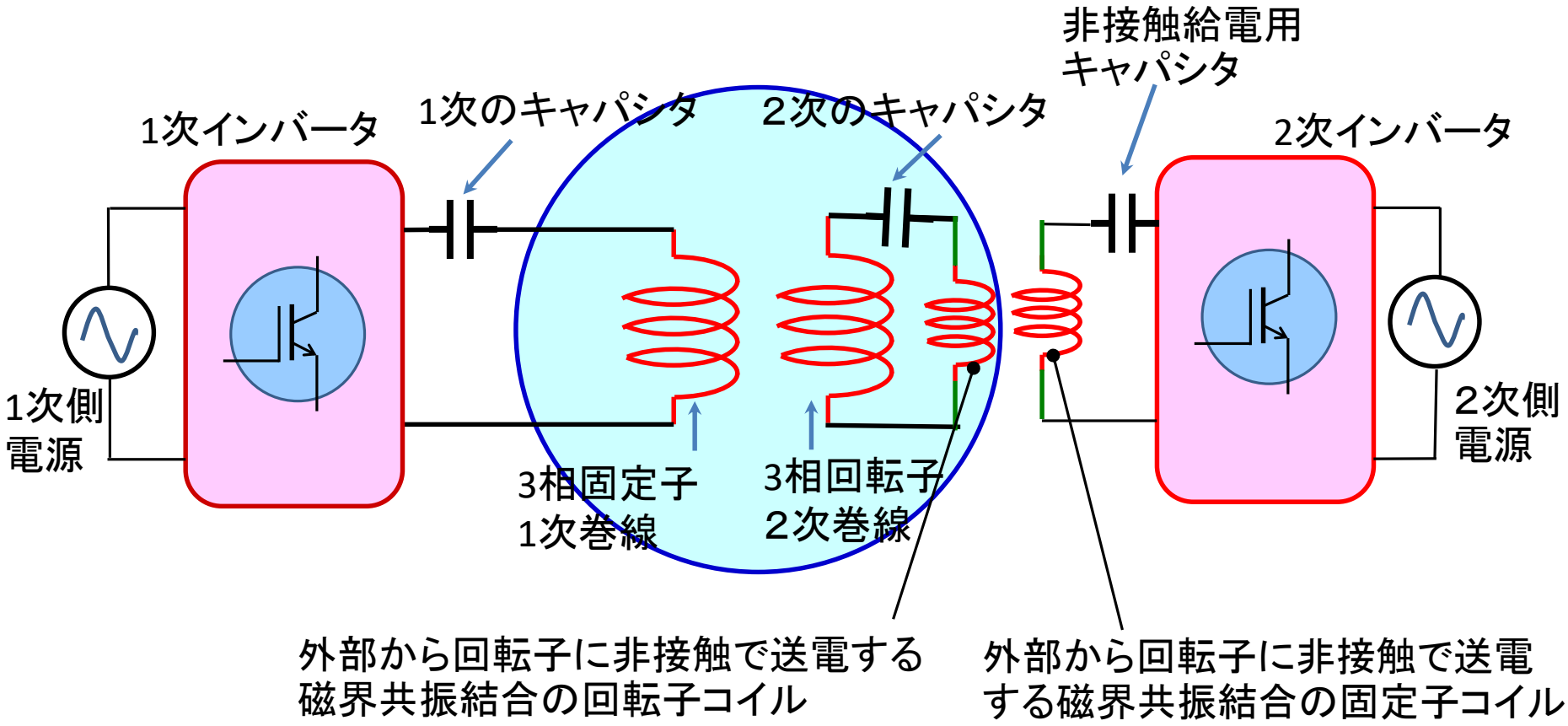
新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!



# 本発明のシステムの基本的な回路の模式図

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

## 本発明のシステムの基本的な回路の模式図




## 両側給電の磁界共振結合回転電機の電気的基本構成

# 飛躍的な高出力密度：①＋②両側給電磁界共振結合モータ
# 新技術：両側給電の磁界共振結合モータ・発電機システム

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

◇社会実装（応用）：
電気飛行機（空飛ぶ車・無人飛行機・電動航空機），
電気自動車，鉄道，風力発電

◇特に移動体やモバイル機器
→重量当たりの出力が最も重要

○発明技術が生み出す能力
10 ～20 kW/kg の高出力密度のモータ・発電機システム
・現状市販の電気自動車・ハイブリッド自動車：1～2 kW/kg
・日本国家PJ：8 kW/kg，電動航空機（欧米）10～20 kW/kg
（出力密度：モータ・発電機の出力／重量）

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

# 企業への期待

- 電気飛行機，小型高出力の次世代電気自動車を開発中の企業、電気推進システム分野への展開を考えている企業には、本技術の導入が有効と思われる。

→ 技術ライセンスの供与

新技術説明会
New Technology Presentation Meetings!

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称　：二重給電型回転電機および二重給電型電磁共振回転電機
- 出願番号　　：特願2022-131283
- 出願人　　：学校法人東洋大学
- 発明者　　：堺　和人

# お問い合わせ先

東洋大学　産官学連携推進センター
（研究推進部　産官学連携推進課）
TEL　03－3945－7564
FAX　03－3945－7906
e-mail ml-chizai@toyo.jp