

ガスタービン発電プラント制御装置向け 新型リモート I/O システムの開発

Development of Next-Generation Remote I/O System for Gas Turbine Controllers

鎮目大	技術開発本部総合開発センター電機システム開発部	主査
熊谷正伸	技術開発本部総合開発センター制御技術開発部	部長
山上淳二	技術開発本部総合開発センター制御技術開発部	主査
新妻素直	技術開発本部インキュベーションセンター	主幹
阿久津貴之	エネルギー・プラントセクタープロジェクトセンター原動機 PJ 統括部	主査

当社が保有するリアルタイム組み込み技術を利用して、ガスタービン発電プラント制御装置 CSI シリーズ向けに新型リモート I/O システムを開発した。本システムでは、産業用イーサネットを利用した通信システムをベースに、待機冗長系 2 重化、通信系統 2 重化、通信経路 2 重化の高信頼性化を実現している。また、ガスタービン制御に必要な信頼性・高速性と同時に、プラント制御・監視に必要な多点入出力にも対応しており、最短通信周期 1 ms (16 ユニット時) と最大 90 ユニット (通信周期 4 ms 時) の通信を実現している。

We have developed a next-generation remote I/O system for CSI series gas turbine power plant controllers by applying our real-time embedded technology. This system is based on an industrial Ethernet communication system, and has achieved high reliability through hot-stand-by-redundancy, network redundancy and communication cable redundancy. In addition to the high reliability and high speed communication required for gas turbine control, it also handles many inputs and outputs as is required for plant control and monitoring. The shortest communication cycle is 1 ms (for 16 units) and it can send and receive up to 90 units (per 4 ms communication cycle).

1. 緒言

当社では原動機メーカーとしての知見を活かした高度な制御を実現するため、ガスタービン発電プラント制御装置 CSI (Control System of IHI) シリーズを自社開発し製品化している^{(1),(2)}。ガスタービンコンバインドサイクル発電設備を例に、ガスタービン発電プラント制御装置 CSI-III+ のシステム構成を第 1 図に示す。CSI-III+ は、ガスタービン制御だけでなく、排熱回収ボイラ (HRSG)、蒸気タービン (ST)、ポンプなどの補機類を含むプラント全体を制御する。大規模なガスタービン発電プラントでは、制御装置と制御対象となるガスタービンが離れて設置されているため、1996 年から独自のリモート I/O システム (RIO) を導入し、プラント内のセンサ、アクチュエータと制御装置との間を通信によって接続して省配線化を図っている。

近年、ガスタービン制御、プラント制御・監視において、制御の高度化やリモート局の分散配置によるさらなる省配線化のため、リモート I/O システムに通信周期の高

速化および多点入出力への対応が要求されている。これらの要求に応えるべく、従来のシステムで実現していた高速・高信頼性をさらに高め、かつ多点入出力へ対応する新型リモート I/O システムを開発した。

本稿では、開発した新型リモート I/O システムの概要と実現した高速・高信頼性・多点入出力通信の機能および性能について述べる。

2. 新型リモート I/O システム

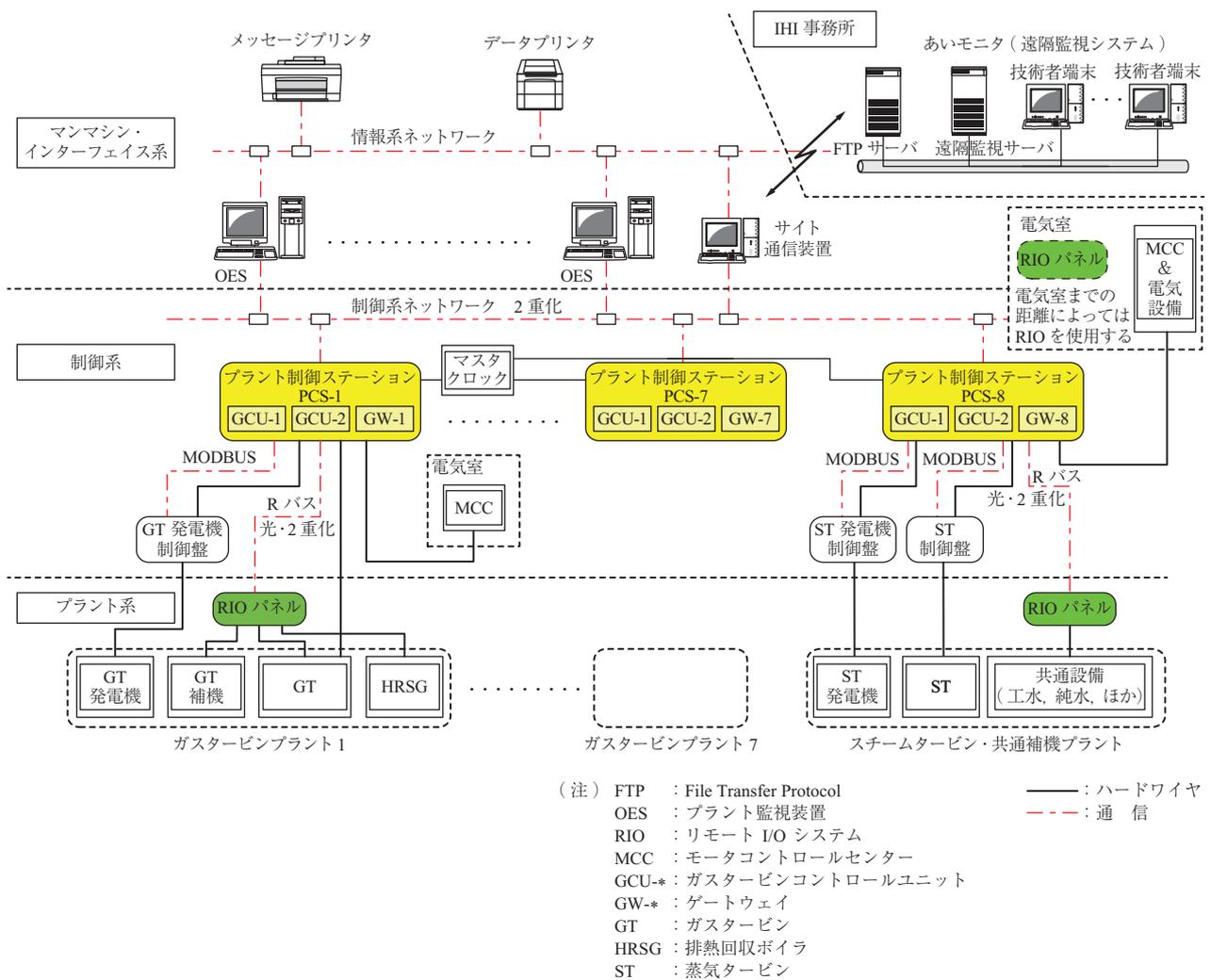
2.1 システム構成

第 2 図に新型リモート I/O システムの構成を示す。システムを構成する以下の機器を開発した。

(1) マスタ局基板

リモート局との通信を制御するプロセッサ基板であり、制御装置に搭載される。

従来のリモート I/O システムでは独自の仕様の通信方式を用いていたが、今回、産業用イーサネット仕様に基づく通信方式に変更し、高速通信を実現した。



第 1 図 ガスタービン発電プラント制御装置 CSI-III+ システム構成
 Fig. 1 Configuration of gas turbine power plant control system (CSI-III+)

(2) 通信分配・集約装置

2.2.3 項および 3.1 節で後述するが、制御装置を 2 重化（主系／従系）するために、通信データを主系と従系の二つの制御装置へ分配し、また、二つの制御装置からの通信データを 1 系統のネットワークへ集約して送信する。発電プラント制御に必要な高信頼性を実現する装置である。

(3) リモート局

制御対象（ガスタービンなど）の脇に設置される。センサ、アクチュエータと接続するため、デジタル信号の入出力やアナログ信号の入出力を行うものなど、目的に応じて複数種類のユニットがある。

2.2 特 長

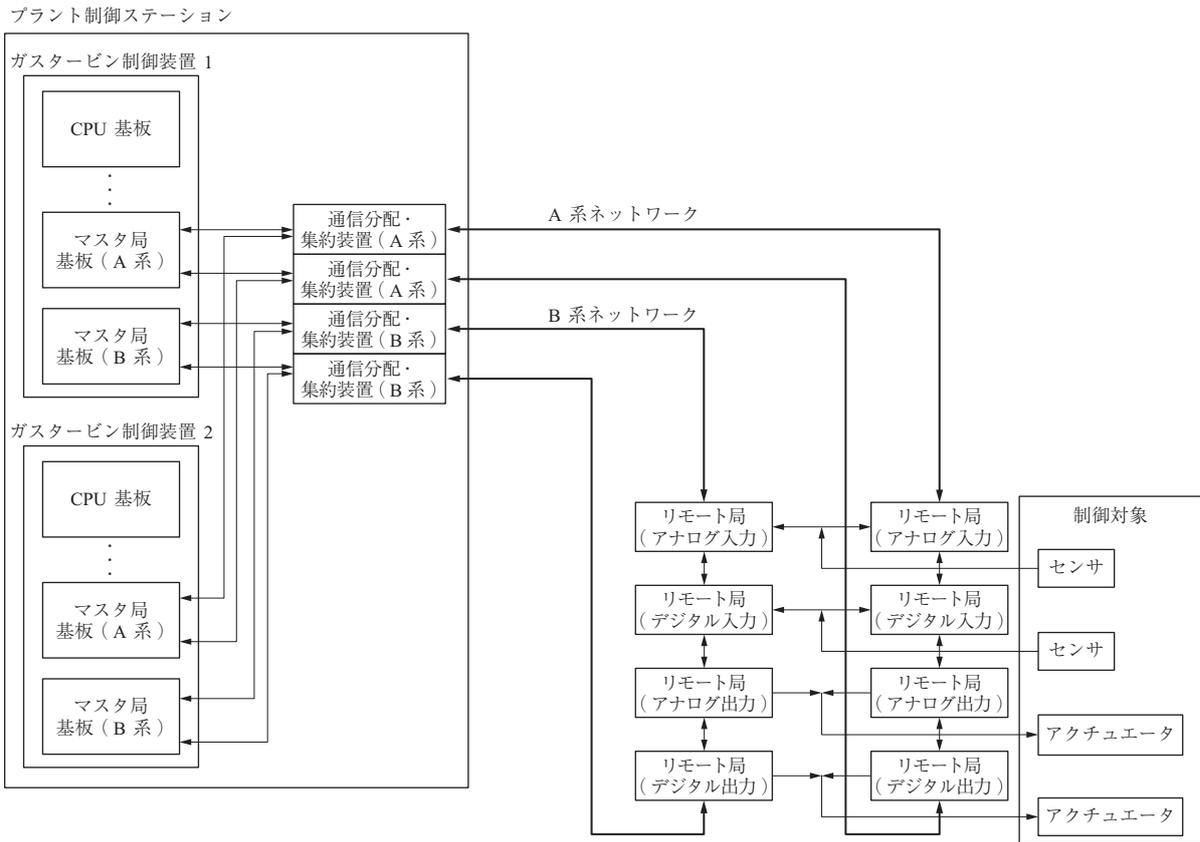
新型リモート I/O システムの目標仕様および従来のリモート I/O システムとの比較を第 1 表に示す。

また、新型リモート I/O システムの特長を以下に示す。

2.2.1 高速通信・多点入出力を実現する通信プロトコル

本システムでは、リモート局と制御装置をつなぐ通信プロトコルとして産業用イーサネットの通信規格を採用した。産業用イーサネットは一般的なイーサネットと異なり、高速性、リアルタイム性が保証されており、主にファクトリーオートメーション、モーションコントロール分野で普及が進んでいる。

当社の従来のリモート I/O システムでは、通信プロトコルの物理層にはイーサネット規格を採用していたが、標準的な通信仕様では要求仕様（通信周期、入出力数）を満足できないため、当社独自の通信仕様を策定、使用していた⁽³⁾。しかし、今回さらに多くのリモート局と高速に通信するためには通信プロトコルを刷新する必要があった。また、ガスタービン発電プラント制御装置は長期間にわたって運用されるものであり、部品の安定供給性、拡張



第2図 新型リモート I/O システム構成
Fig. 2 Configuration of next-generation remote I/O system

第1表 リモート I/O システム比較
Table 1 Comparison of remote I/O system

項目	単位	新型リモート I/O システム	従来リモート I/O システム
通信周期	ms	1 (16 ユニット時) ~ 4	4 (最短) ~ 20
通信速度	Mbps	100	10
最大リモート局数	ユニット	90	16
通信プロトコル	-	産業用イーサネット	独自仕様
トポロジー	-	リング型	バス型
リモート局機器タイプ	-	スタンドアロン・ユニット型	専用ラック搭載型
待機冗長系 2 重化機能	-	あり	あり
通信系統 2 重化機能	-	あり	あり
通信経路 2 重化機能	-	あり	なし
入出力自己診断機能	-	あり	あり

性が重要であることから、オープンな産業用イーサネット規格を採用した。

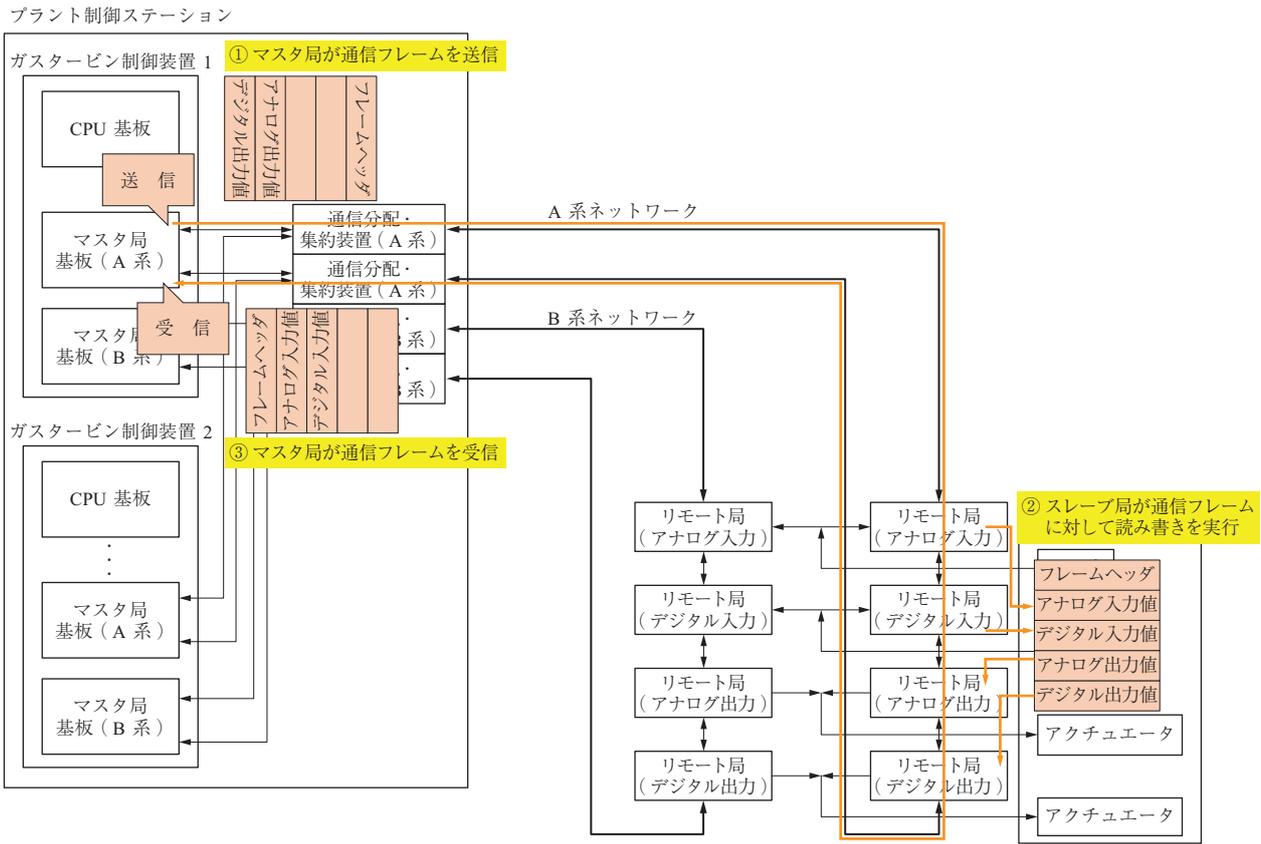
第3図に示すとおり、今回採用した通信プロトコルでは、一つのマスター局が周期的に通信フレームを送出し、そのフレームに対して複数のリモート局が読み書きを行い、さらにそのフレームがマスター局に戻ることによってマスター局とリモート局間の通信を実現している。ネットワークのトポロジーも柔軟に構成することが可能であるが、通信フレームの伝送経路としては、一筆書きとなる。これはスイッチングハブを中心としたスター型トポロジーとなる一

般的なイーサネットと大きく異なる点であり、これによって高速・低遅延・大容量の通信が実現でき、また、通信ケーブルの配線もシンプルにすることができる。

2.2.2 リモート局のさらなる分散配置に対応

大規模なガスタービン発電プラントの全域にわたってセンサ・アクチュエータが分散して設置されており、これらにより近い位置にリモート局を配置してさらなる省配線化を図ることでコストを低減することができる。

従来のリモート局は、専用のラックのスロットにリモート局用基板を搭載するタイプであるため、一つのラックに



第3図 通信フレームの経路
Fig. 3 Route of Ethernet frame

多くのリモート局用基板を搭載するほどシステム全体で必要な専用ラックの数を減らせ、コスト効率が高くなる。しかし、リモート局をさらに分散配置するためには、リモート局用基板が少数だけ搭載された専用ラックを多数配置することになる。このため、設置スペースが多く必要となることがあり、省配線化によるコスト低減の効果が相殺される可能性がある。新型のリモート局は、このような問題点に対応するため、スタンドアロンで動作可能な小型ユニットタイプとした。

第4図に、今回開発した新型リモート I/O リモート局外観を示す。従来と同じくアナログ入力、アナログ出力、



第4図 新型リモート I/O リモート局外観
Fig. 4 Remote unit for next-generation remote I/O system

デジタル入力、デジタル出力の4種類のリモート局がある。

リモート局には産業用イーサネット規格に対応した専用の MAC (Media Access Control) 層ハードウェアを搭載し、また、参考文献(3)で述べられている入出力診断回路などの自己診断機能はそのままに、単一電源入力動作への対応、耐ノイズ性能向上などの仕様強化を行っている。さらに、最新の電子部品(マイコン、FPGA (Field Programmable Gate Array) など)を利用して小型化している。

2.2.3 2重化による高信頼性化

ガスタービン発電プラント制御装置は、高い信頼性、特に可用性が求められる。電子部品の故障やケーブル断線、電源異常などの障害(単一障害)が発生した場合でも、これを瞬時に検知して、運転を継続しなければならない。そのため、リモート I/O システムでもさまざまな冗長化機能が要求される。以下に本システムの冗長化機能を示す。

(1) 待機冗長系 2重化機能

ガスタービン制御装置は2重化されており、待機冗長系 2重化(ホットスタンバイ)を構成している

る。制御装置の一方が主系、もう一方が従系となり、従系の制御装置も主系と同じ入力データを用いて制御演算を常時実行している。主系の制御装置に障害が発生した場合、従系の制御装置へ無瞬断で主従を切り替えて運転を継続する。

このような無瞬断切替を実現するためには、リモート I/O システムも同様に待機冗長系 2 重化（ホットスタンバイ）の機能が実現できなければならない。しかし、採用した産業用イーサネット規格のマスター局 2 重化システムの実現例は、主従切替を行った後、数秒後に通信が再開するコールドスタンバイの事例はすでにあつたものの、無瞬断で切り替わるホットスタンバイは世界的にも前例がない機能であるため、マスター局のホットスタンバイ機能を独自に開発した。詳細は 3 章で後述する。

(2) 通信系統 2 重化機能

リモート I/O システムでは、以前から、通信系統 2 重化（A 系、B 系）を適用しており、リモート局を 2 重化して、それぞれを別の通信系統で制御装置へ接続している⁽³⁾。

第 5 図に示すとおり、新型システムにおいても一

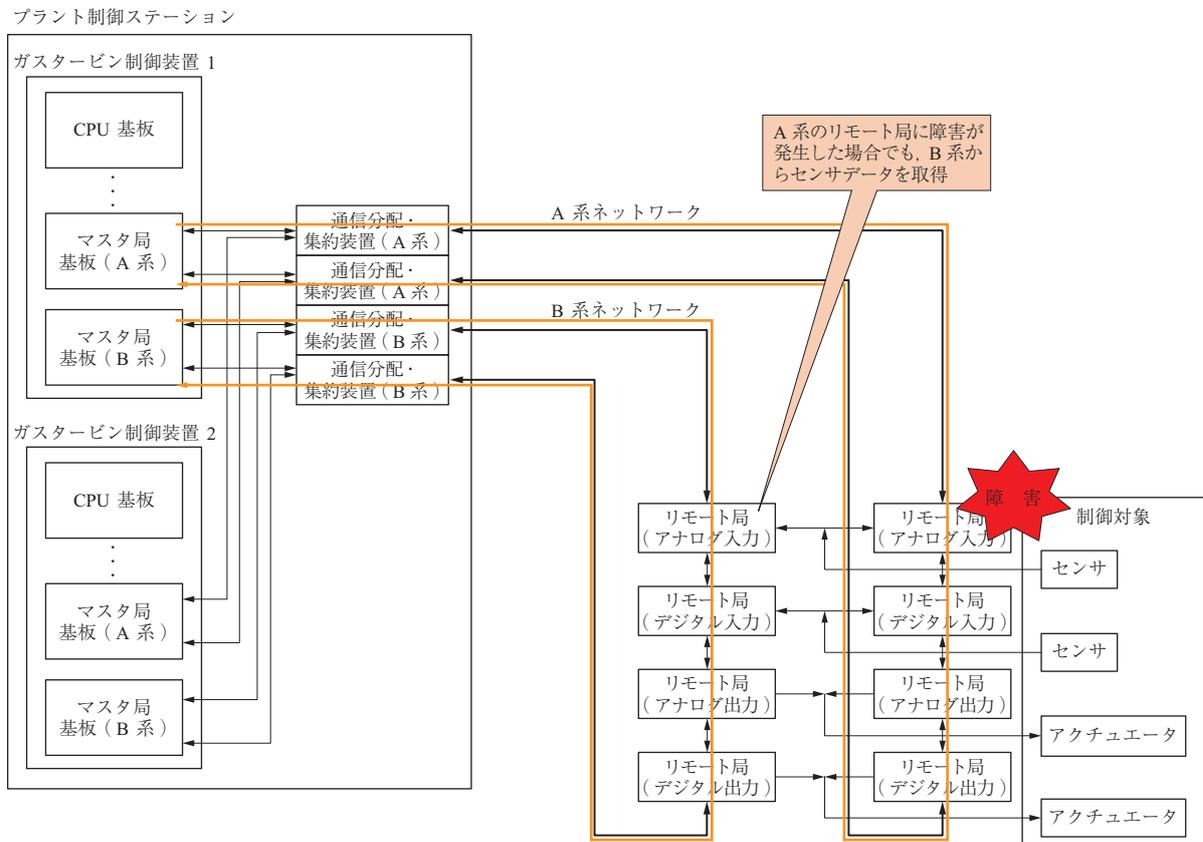
つの制御装置へ二つの通信系統（A 系、B 系）のマスター局を搭載し、それぞれのネットワークを構成することで本機能を実現している。

マスター局はリモート局との通信状態やリモート局の自己診断情報などを監視しており、あるリモート局との通信が途絶えた場合や、リモート局が自己診断異常を検知した場合などは、これを制御装置の CPU へ通知することができる。これによって、一方の系のリモート局に障害が発生した場合でも、瞬時に正常なリモート局へ切り替えて入出力を継続することができる。

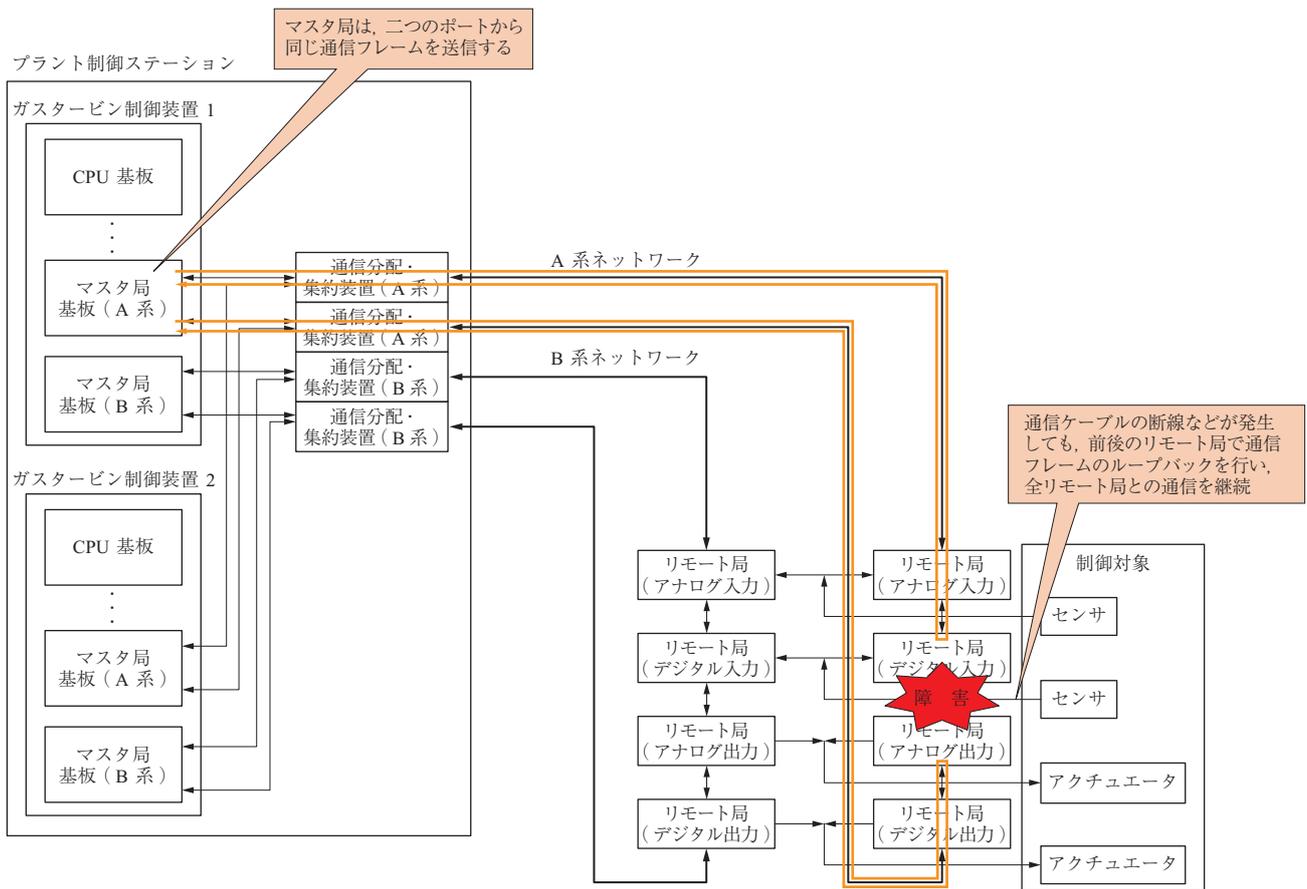
(3) 通信経路 2 重化機能

本リモート I/O システムのネットワークは、リング型のトポロジーを採用しており、産業用イーサネット規格で規格化されている通信ケーブル 2 重化機能を利用して通信経路の 2 重化を実現している。第 6 図に示すとおり、通信ケーブルの断線などが 1 か所に発生しても、その前後のリモート局で瞬時にフレームをループバックすることで、すべてのリモート局との通信を継続することができる。

また、多くのリモート局がプラント内に分散して



第 5 図 通信系統 2 重化機能（リモート局 2 重化機能）
Fig. 5 Remote I/O network redundancy (remote unit redundancy)



第 6 図 通信経路 2 重化機能
Fig. 6 Cable redundancy

配備されるため、通信ケーブル断線などの障害発生箇所をプラント監視装置 (OES) から遠隔で特定できるようにしている。

3. マスタ局待機冗長系 2 重化機能

本システムの特長として 2.2.3 項で述べた待機冗長系 2 重化機能への対応に当たって開発した、産業用イーサネットマスタ局の 2 重化機能は産業用イーサネットの protocols を独自に拡張したものであり、本システムの開発における大きな特長の一つである。これについて詳細を述べる。

3.1 従系マスタ局の通信処理

制御装置の待機冗長系 2 重化 (ホットスタンバイ) において、主系のマスタ局の通信データと同一の通信データを従系のマスタ局が取得する手段が必要となる。また、主系と従系の両方が通信フレームを送信すると、ネットワーク上の通信量が 2 倍に増えてしまい帯域使用効率が悪化すること、通信分配・集約装置にて通信フレームが待たされてリアルタイム性が確保できないことが問題となる。

このため、第 7 図に示すように、主系のマスタ局のみ

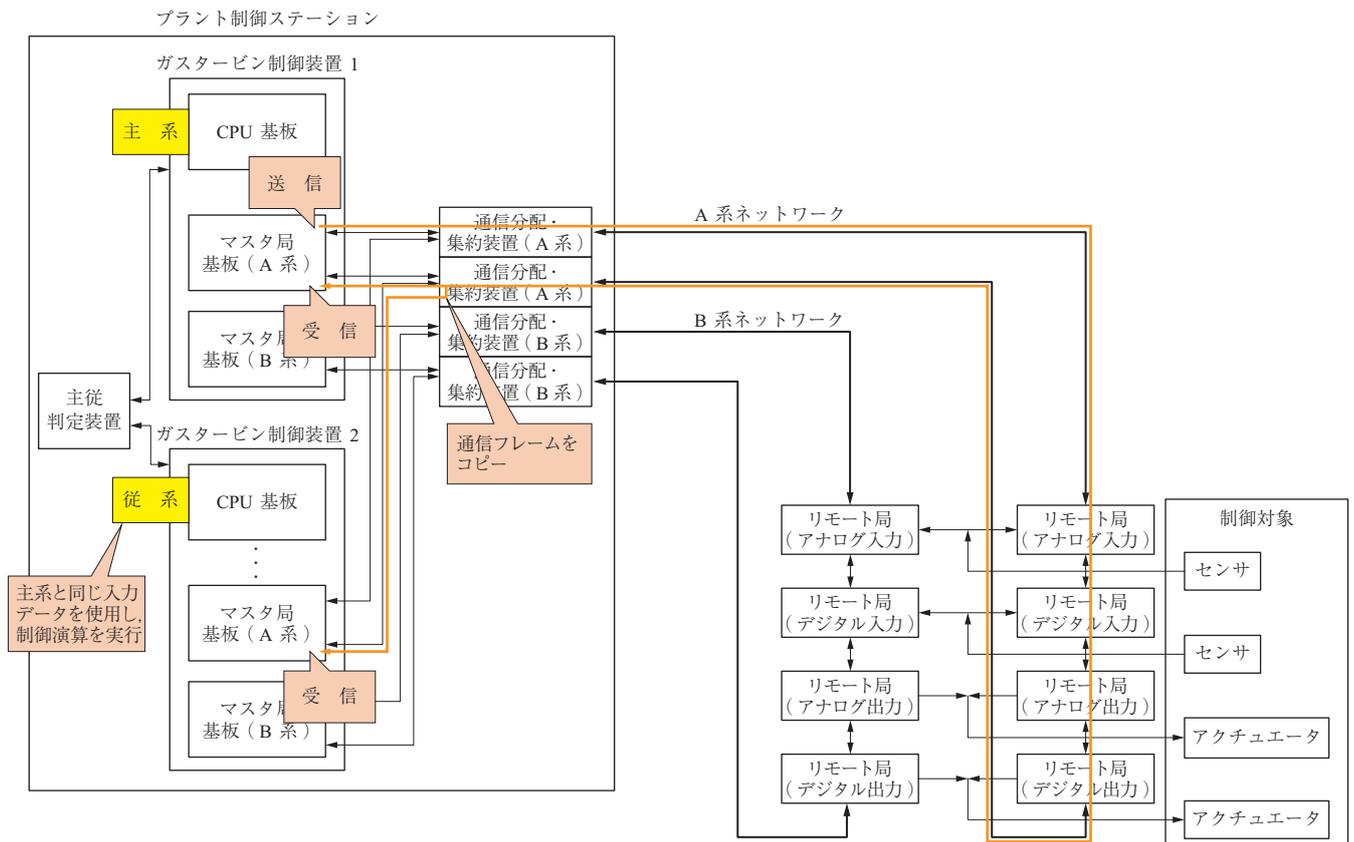
がリモート I/O のネットワークに通信フレームを送信し、戻りの通信フレームを主系と従系の両方が受信できるように、通信分配・集約装置にて通信フレームをコピーして二つのマスタ局へ分配するようにした。

主系のマスタ局は単一系の場合と同様に、自身が送信した通信フレームの戻りの通信フレームを受信して処理するが、従系のマスタ局は通信フレームを送信せずに受信のみを行い、主系と同一の入力データを得る。

このように、従系時のマスタ局の通信処理を独自に開発し、入出力データの同一性の保証、ネットワークの通信量削減、マスタ局の受信処理負荷軽減、通信のリアルタイム性保証を実現している。

3.2 リモート局初期化の通信処理

今回採用した産業用イーサネット規格では、高速にデータを通信するための周期通信、リモート局の設定や状態管理などを行うための非周期通信の 2 種類の通信機能が規定されている。リモート I/O のデータ通信は周期通信を利用しているが、システムの起動時にはマスタ局がリモート局へ初期設定を行うために非周期通信を実行し、この通信によってマスタ局とリモート局間のデータ通信 (周期



第 7 図 マスタ局 2 重化機能 (ガスタービン制御装置 1 が主系の場合)
 Fig. 7 Master redundancy (Controller #1 is active, Controller #2 is in standby.)

通信) が確立する。

2 重化システムでは、主系のマスタ局のみがリモート局の初期設定の通信を実行し、従系のマスタ局はリモート局への初期設定の通信を行わずにデータ通信を確立するようにした。これは、両方のマスタ局からリモート局への初期設定通信を行ってしまうと、非周期通信が混在することでネットワーク管理状態の不整合が発生してマスタ局とリモート局との通信が確立できないためである。

3.3 無瞬断主従切替

制御装置の主従切替によって、従系であったマスタ局が瞬時に主系となって通信を実行することが必要となる。

制御装置の主従を決定している主従判定装置からの情報を常時監視し、従系から主系に替わった場合は瞬時に通信フレームの送信を実行し、また、主系から従系に替わった場合は瞬時に通信フレームの送信を停止する。第 7 図に示す状態から主従切替が行われると、瞬時に第 8 図の状態に切り替わることになる。主従切替の瞬間においても、お互いに通信フレームを監視して必ず一方のマスタ局のみが周期通信および非周期通信の送信を行うようにして、通信データの同一性とリアルタイム性を保証している。

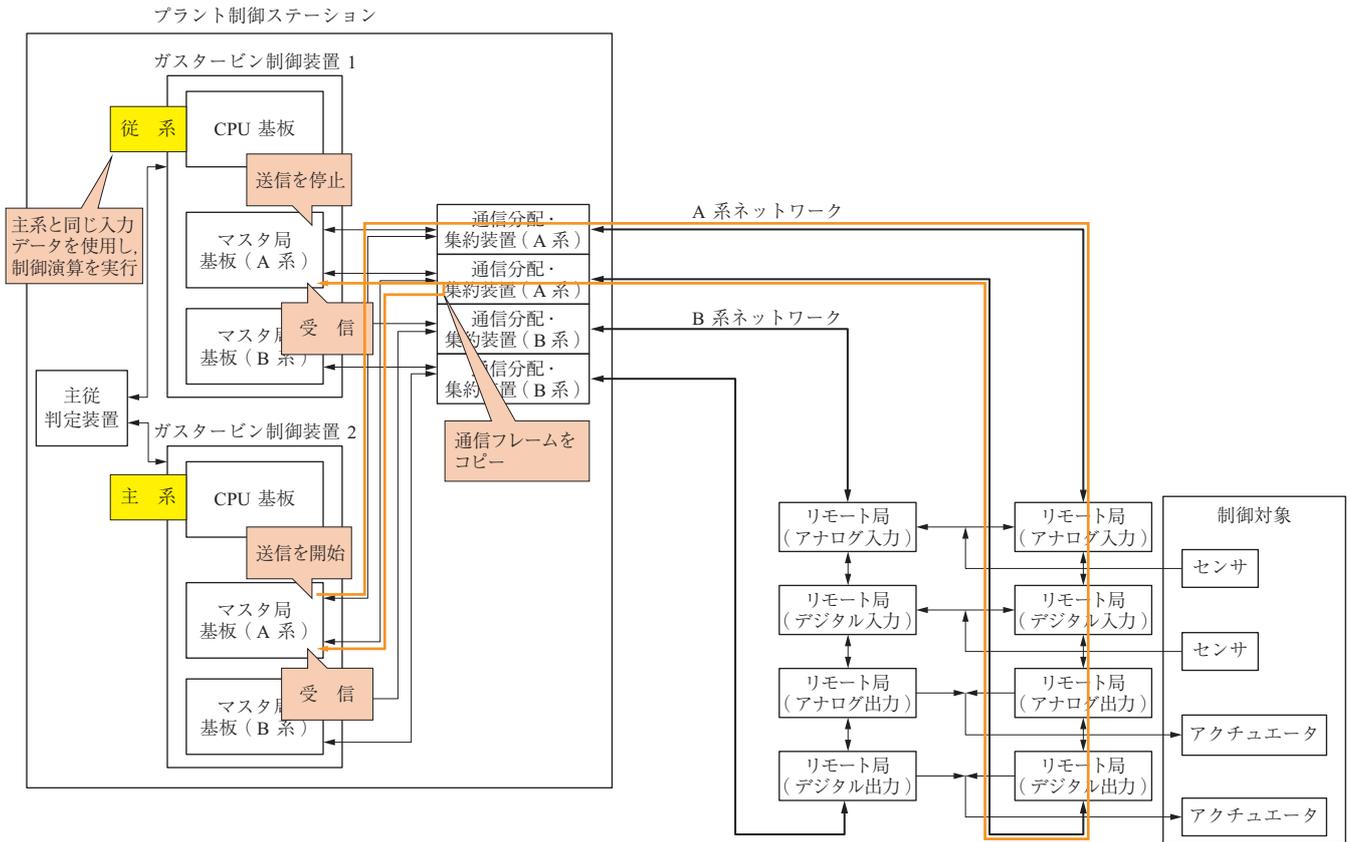
500 ms 間隔で制御装置の主従切替を行う連続試験を行

い、通信データが正しく取得できること、通信が一瞬であっても途絶えないこと、必ず一つのマスタのみがフレームを送信すること、など、ホットスタンバイ機能が正常に動作することを確認した。

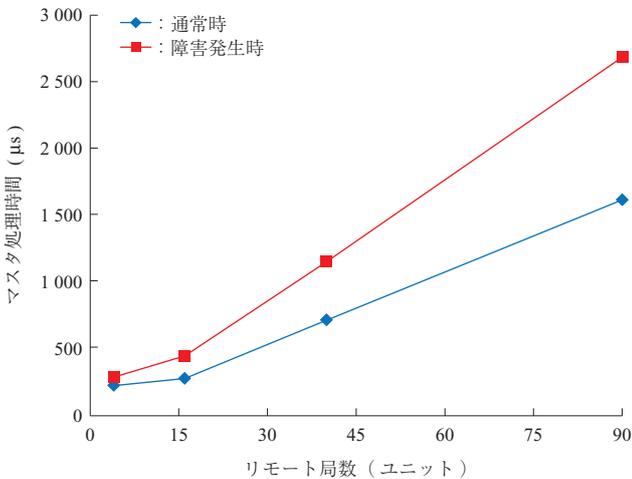
4. 性能

本システムにおいて、接続されるリモート局ユニットの数と通信性能の関係を確認した。マスタ局の CPU に動作クロック 400 MHz のマイコンを使用した場合のリモート局数とマスタ処理時間の結果を第 9 図に示す。

マスタ局の処理時間はリモート局 16 ユニット時において 280 μs、障害が発生してマスタ局の処理負荷が高くなった場合においても 450 μs となっている。これによって 500 μs 周期の通信も可能な性能であることが確認できた。また、30 ユニットまで 1 ms 周期の通信が可能な性能であり、目標仕様である 16 ユニット時の通信周期 1 ms の通信が実現できていることを確認した。従来システムと比較して最短通信周期が 1/4 以下まで短縮され、通信が高速化されている。これによって、排ガス対策や省エネのために必要となる、より周期の短い、高度な制御に対応できる。



第 8 図 マスタ局 2 重化機能 (ガスタービン制御装置 2 が主系の場合)
 Fig. 8 Master redundancy (Controller #2 is active, Controller #1 is in standby.)



第 9 図 リモート局数とマスタ処理時間
 Fig. 9 Number of remote units vs processing time

さらに、通信周期 3 ms の場合、リモート局を最大 90 ユニットまで接続可能であり、目標仕様である通信周期 4 ms 時の 90 ユニットの接続が実現できていることを確認した。従来システムからリモート局数を 5 倍以上に増やすことができ、今後のガスタービン発電プラントの制御や故障解析・予防保全機能で必要になる入出力点数の増加に対応可能である。

最短通信周期や最大接続ユニット数などの通信性能は、

マスタ局の処理性能に依存するため、マスタ局の CPU をさらに高速なものに置き換えることで、システムの通信性能をさらに向上できる余地を残しており、将来の機能拡張にも対応可能である。

5. 結 言

ガスタービン発電プラント制御装置向け新型リモート I/O システムの通信プロトコルに産業用イーサネット規格を採用し、最高通信周期 1 ms (16 ユニット時) と最大 90 ユニット (通信周期 4 ms 時) の通信を実現した。これは、従来システムと比較して、最短通信周期 1/4 以下 (4 ms → 1 ms)、最大リモート局数 5 倍以上 (16 ユニット → 90 ユニット) の性能である。また、ガスタービン制御に必要な信頼性を維持するため、独自にマスタ局の 2 重化 (ホットスタンバイ) 機能を開発した。排ガス対策・省エネを背景にますます複雑化するガスタービン発電プラント制御装置を、競争力ある性能・コストで実現することができる。

今後も最新の組み込み技術をベースとしたセンシング技術・通信技術・制御技術の開発に取り組み、IHI グループ製品の高度化を図っていく所存である。

— 謝 辞 —

株式会社 IHI 検査計測にはシステム開発・設計に関して多大なご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 山上淳二, 岡島一道, 小山 修, 山本修三, 大貫宏和: 新型ガスタービン制御装置の開発 石川島

播磨技報 第 47 卷 第 2 号 2007 年 6 月 pp. 65
- 70

- (2) IHI ホームページ, 原動機プラント事業: (オンライン) 入手先 < <http://www.ihl.co.jp/powersystems/technology/csi.html> > (参照 2014-07-14)
- (3) 甲斐谷聖, 岩崎郁夫, 鎮目 大, 寺内 強, 守田 暁行: 情報通信・制御分野を支える組み込み技術 IHI 技報 第 51 卷 第 2 号 2011 年 6 月 pp. 38
- 42