

# 無線を用いた新しい列車制御システム ATACSの安全確保の考え方について



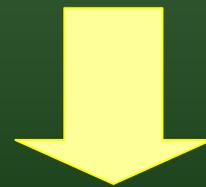
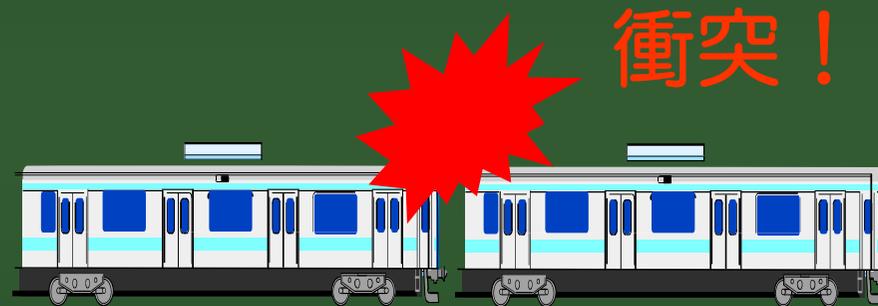
東日本旅客鉄道株式会社

**ATACS : Advanced Train Administration  
and Communications System**

# 列車制御システムとは

1つの線路に複数の列車が存在する場合、誰もコントロールをしなければ列車は衝突してしまう。

(列車は急に止まれない、列車は線路上しか走れない)



このような衝突などを防止するのが列車制御システムである

# 鉄道信号の歩み

---

1830年 世界初の鉄道 英国リバプール・マンチェスター間で開業

1841年 世界初の腕木式信号機の導入(英国)

1856年 世界初の機械式連動装置(サクスビー式)導入 (英国)

**1872年 世界初の軌道回路(ロビンソン式)導入 (米国)**

日本初の鉄道 新橋・横浜間で開業

1904年 日本初の軌道回路・自動式信号機導入 (甲武鉄道 飯田町・新宿)

1927年 世界初の列車集中制御装置(CTC)導入 (米国)

日本初のATS装置(打子式)導入 (地下鉄 浅草・上野)

1964年 日本初のATC装置導入 (東海道新幹線、地下鉄日比谷線)

1978年 世界初の電子連動装置導入 (スウェーデン)

1984年 日本初の電子連動装置導入(東急 中央林間)

1985年 国鉄初の電子連動装置導入 (東神奈川)

# 鉄道信号の歩み

---

1830年 世界初の鉄道 英国リバプール・マンチェスター間で開業

1841年 世界初の腕木式信号機の導入(英国)

1856年 世界初の機械式連動装置(サクスピー式)導入 (英国)

**1872年 世界初の軌道回路(ロビンソン式)導入 (米国)**

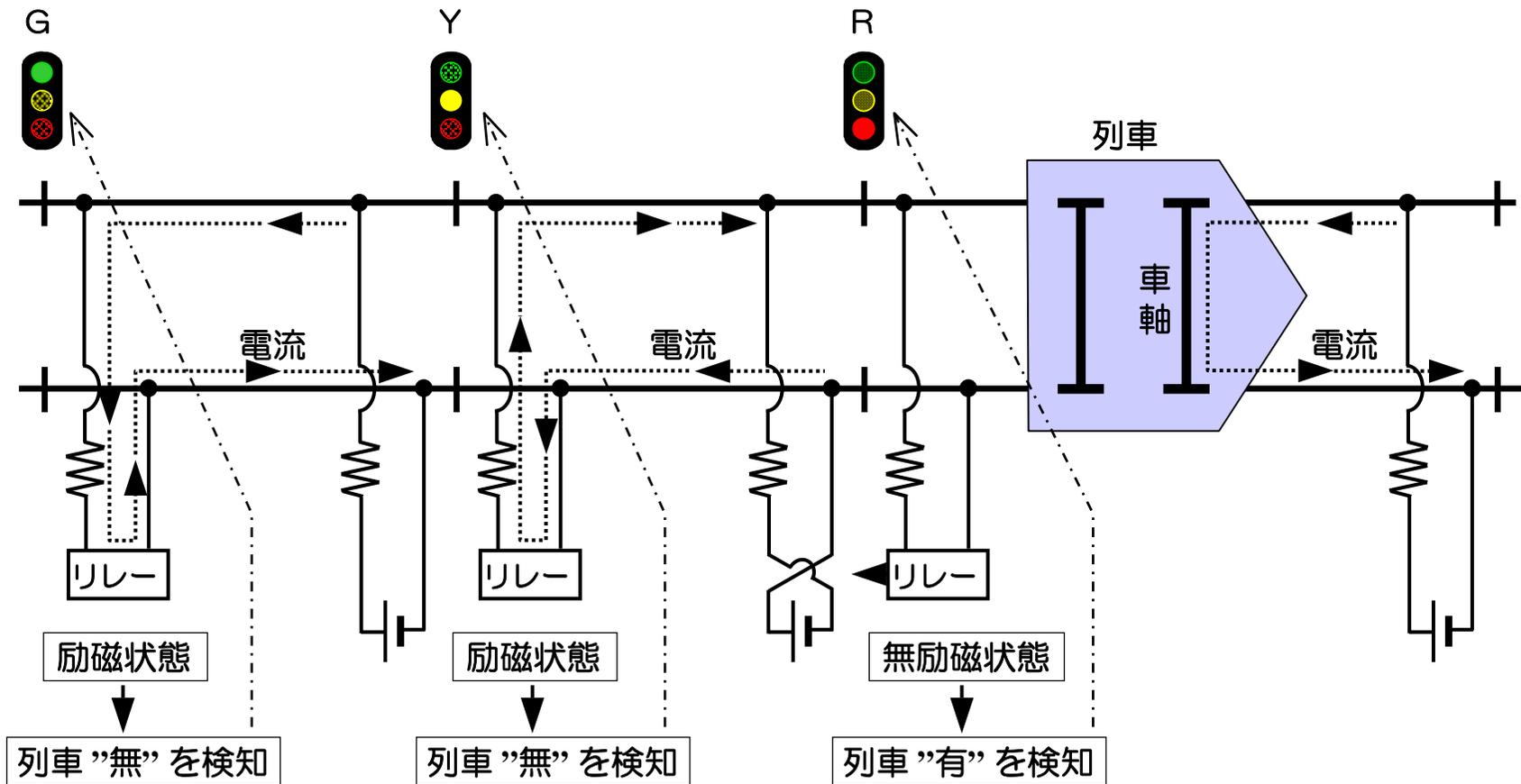


現在の鉄道信号システムは、今もなお軌道回路を  
ベースにシステムが構築されている



ATACSでは軌道回路を使用しない(脱軌道回路)  
約140年ぶりのモデルチェンジ

# 列車間隔の確保（軌道回路、閉そく） 現行



# ATACSの概要

# ATACSのねらい

---

## ○安全性の向上

- ・ 連続制御によるさらなる安全性の向上

## ○地上設備のスリム化

- ・ 軌道回路、地上信号機等の削減
- ・ メンテナンスコストの削減

## ○信頼性のさらなる向上

- ・ 設備削減による信頼性の向上
- ・ 設備の多重化による信頼性の向上

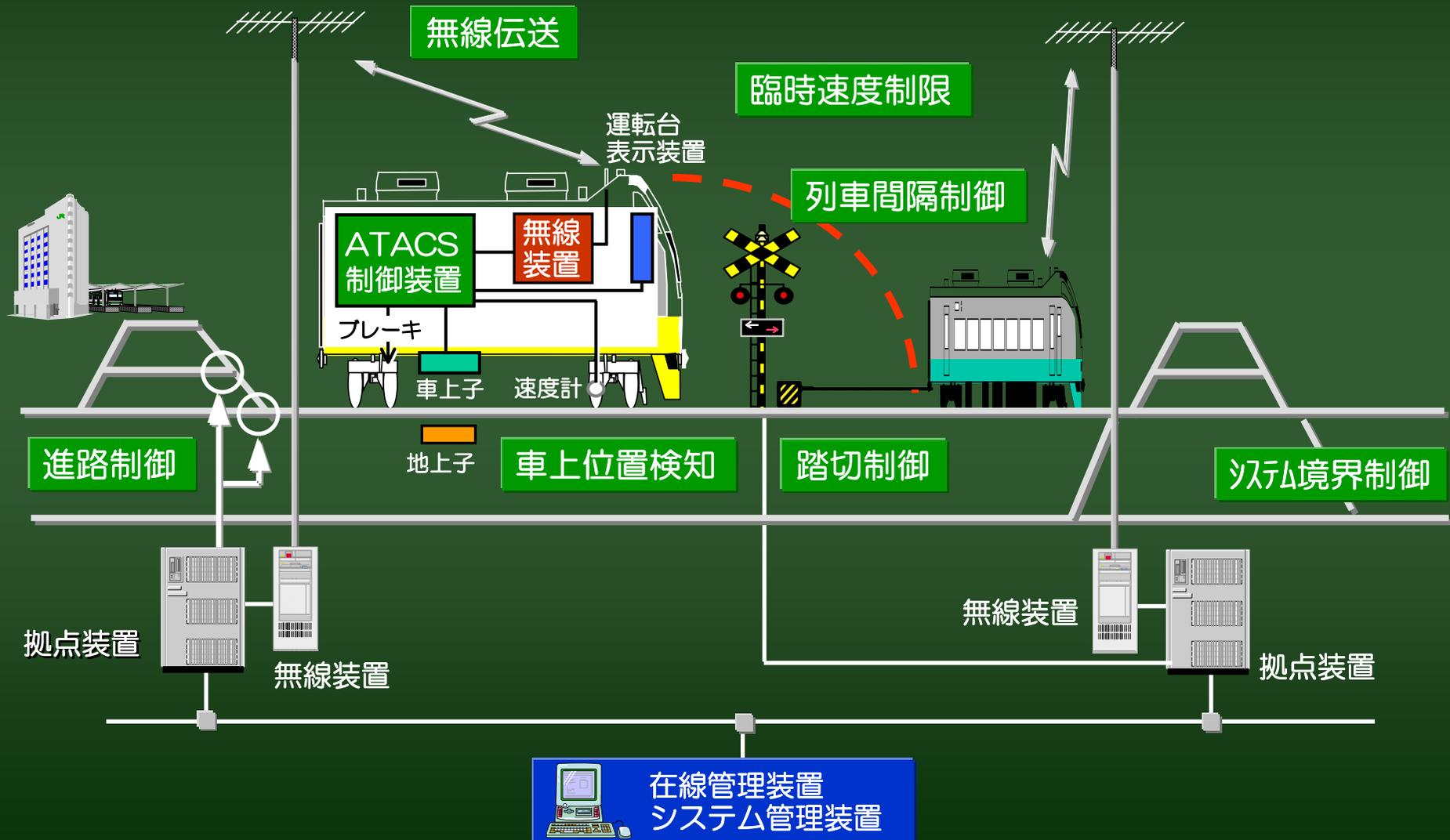
## ○変化に対する追従性

- ・ 線路設備変更の都度必要だった信号設備改良工事の大幅な削減
- ・ 車両性能毎にあわせることができるきめ細かい制御

## ○高機能化による諸改善

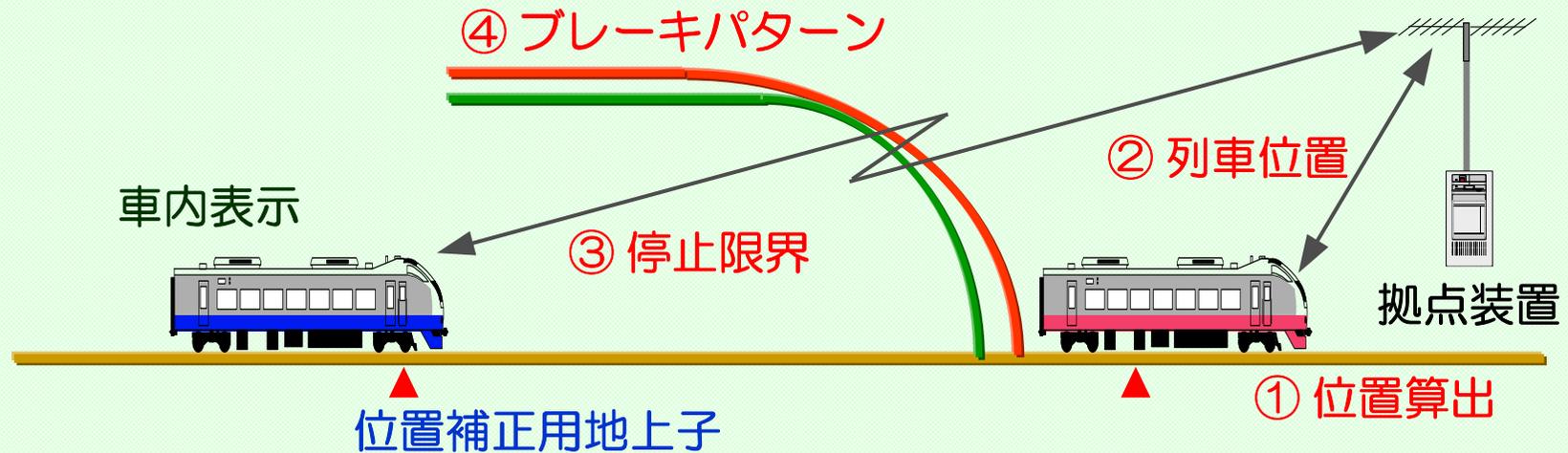
- ・ 臨時速度制限、誤通過防止等の運転支援、指令への情報提供充実
- ・ 踏切警報時分の適正化

# ATACSのシステムイメージ



# ATACSの基本的なしくみ

A  
T  
A  
C  
S



■ ブレーキパターン到達時、ブレーキ制御出力し列車間隔制御を実現

- ① 地上子と速度計により位置算出
- ② 列車位置を無線により拠点装置へ送信
- ③ 先行位置から停止限界を作成し、続行列車へ送信
- ④ 続行列車、停止限界からパターン作成して走行

# ATACSの開発経緯・導入工程

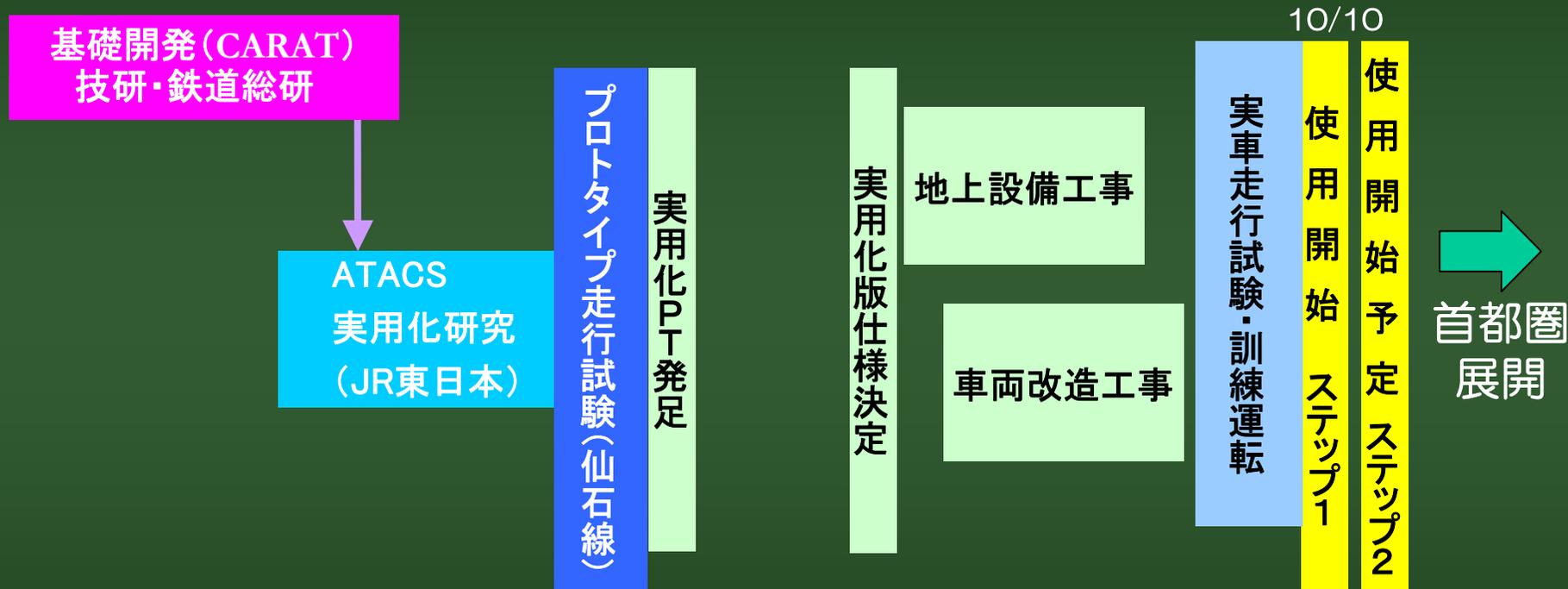
1985

1995

2005

2008

2011



## \*ステップ1

基本機能—列車間隔制御、入換制御、列車防護等

## \*ステップ2

踏切機能、臨時速度制限機能

# ATACSの要素技術 (新しい考え方・技術)

- 列車位置検知
- 無線伝送
- 列車間隔制御

# 位置検知方式

## 地上検知方式

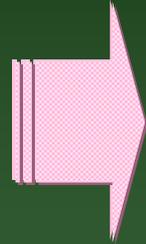
- 軌道回路
- 車軸検知
- SS無線
- ループコイル

## 車上検知方式

- 速度発電機
- GPS
- ドップラー速度計

# 車上位位置検知方式

速度発電機



空転・滑走、安価  
精度  $\pm 0.5\%$  (ATACSでの目標値)  
(補正論理の適用、補正用地上子)

GPS



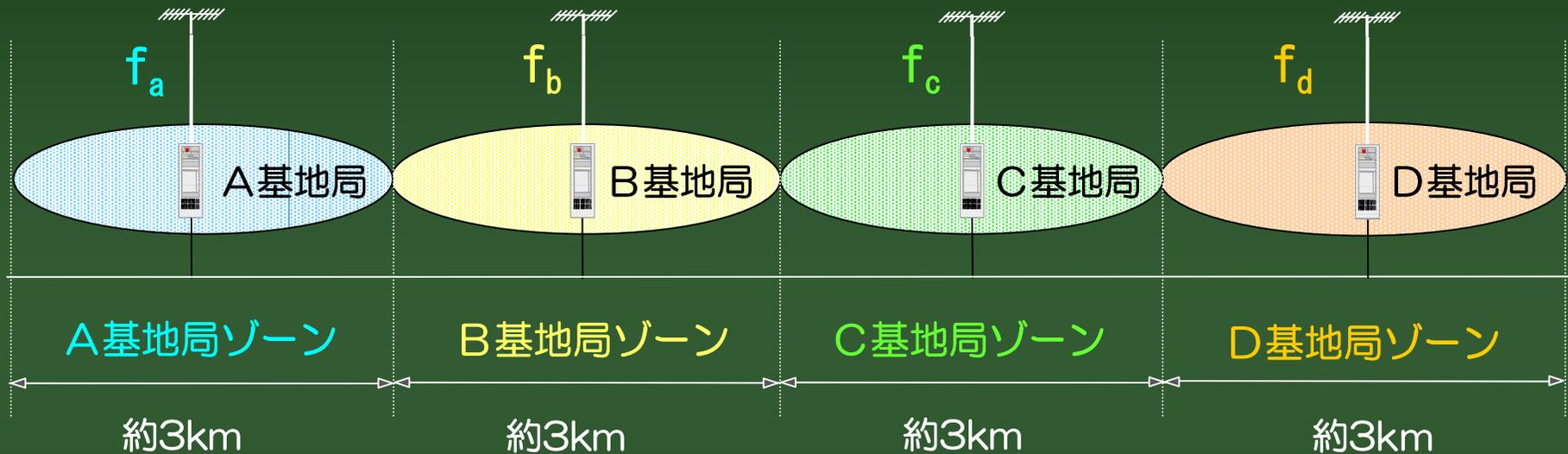
精度に難 (開発当時)  
周囲の影響

ドップラー  
速度計



空転・滑走の影響なし  
精度は良い  
設置時の調整が必要

# ATACSの無線仕様



- |          |                 |          |                 |
|----------|-----------------|----------|-----------------|
| ・ 周波数帯   | 400 MHz帯        | ・ 誤り検出   | CRC             |
| ・ 帯域幅    | 6.25 kHz        | ・ 誤り訂正符号 | リードソロモン符号       |
| ・ アクセス方式 | TDMA            | ・ スロット数  | 16 スロット         |
| ・ 基地局出力  | 3 W             | ・ 制御列車数  | 12 列車           |
| ・ 移動局出力  | 1 W             | ・ 伝送情報量  | 576 bit         |
| ・ 変調方式   | $\pi/4$ シフトQPSK |          | (内列車制御情報312bit) |

# ATACS無線の特徴

---

## 高い周波数効率

- ・ 1チャンネル (6.25kHz) で12列車を制御 (TDMA伝送)

## 列車制御用無線として高い品質を確保

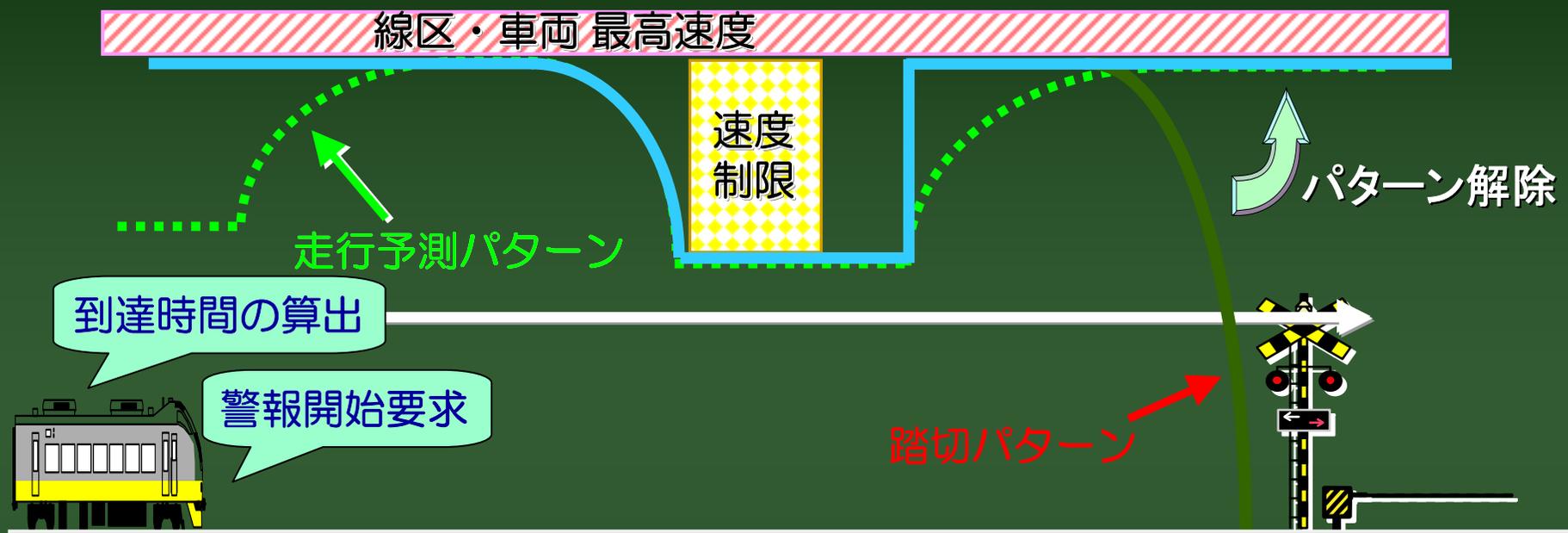
- ・ ATACS独自のハンドオーバー制御
- ・ 地上装置と車上コンピュータとは約1秒おきに無線伝送  
3秒無線通信断で非常ブレーキによる緊急停止
- ・ エリア率は100%
- ・ フレーム受信率は99.9%以上
- ・ 無線バックアップ機能

\* フレーム受信率

総受信フレーム数に対する受信成功フレーム数の割合

# その他機能

# 踏切制御



	ATACS	現 行	
警報制御	列車速度、位置	定点制御	警報時間の適正化 輸送変化に対する柔軟性
警報状態	パターン制御	取込しない	安全性向上
踏切支障	パターン制御	特発（目視）	安全性向上
構内踏切	過走防護 不要	過走防護 要	警報時間の適正化

# 安全確保の考え方

# 安全確保の基本的な考え方

ATACSでは以下のすべてを常時満たすことにより機能の安全性を確保することを基本とする。

## (1)列車位置

車上装置が認識する列車位置は、実際に列車が存在する区間を包含する。

## (2)停止限界

地上装置は、ATACSシステム内のすべての列車位置、進路状態及び走行許可区間を把握して停止限界を設定し、各列車に伝送する。

## (3)ブレーキ制御

車上装置は、運転速度が制限される箇所までに列車の速度を制限される運転速度まで自動的に低下させ、かつ、停止限界までに停止できるようにブレーキ制御を行う。

# 従来システムからの主な変更点

## 地上設備と車上装置間の情報伝送

従来は信号機による現示、レールを介した伝送  
⇒デジタル無線による大容量の双方向通信



## 列車位置検知

従来は軌道回路（地上設備）  
⇒列車自ら列車位置を検出する車上位位置検知（車上設備）

# 無線における安全確保

---

## 伝送で予想される無線妨害

- 自然的妨害

- 雑音
- フェージング

- 人為的妨害

- 盗聴、改ざん、なりすまし
- 無線通信妨害

# 無線における安全確保（自然的妨害）

## フレームフォーマット（無線）



自然的妨害

←フェージング、ノイズ

- ダイバーシチ
- 誤り訂正符号
  - Reed-Solomon code
- 誤り検出符号
  - CRC



危険側誤り率  
( $6.7 \times 10^{-25}/h$ )

# 無線における安全確保（人為的妨害）

- 盗聴・改ざん・なりすまし対策

## ■ 暗号化

- 暗号化を実施
- 強力な暗号（鍵の桁数128bit）
- 複数の鍵を所有し、中央から一斉に鍵を変更可能

## ■ 合理性チェック

- 車上制御装置のIDチェック  
地上装置が車上装置のIDをチェック
- 伝送される電文に通信通番を付加  
通信電文にNo. 1～No. 255の連続番号を付加
- 列車位置情報の合理性チェック  
地上装置が列車位置の追跡を行い、更新される列車位置の合理性をチェック

# 車上位位置検知における安全確保

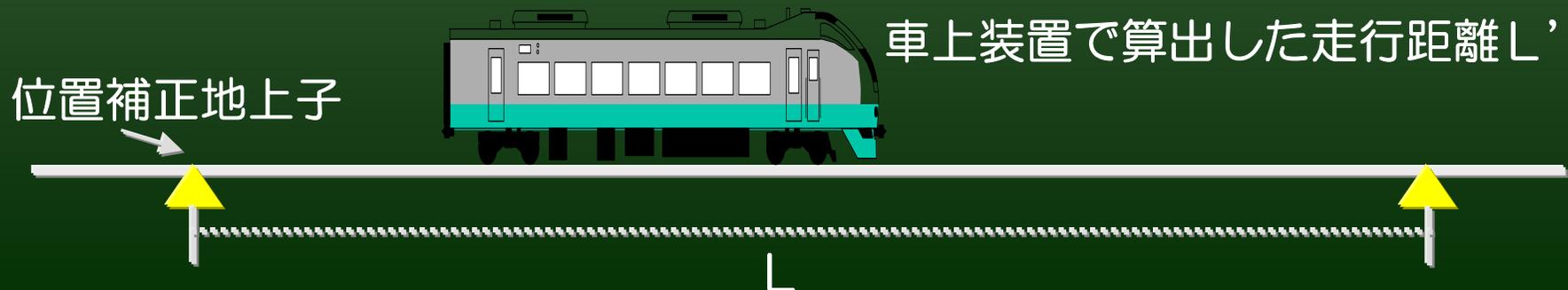
## 速度発電機による走行距離算出時の安全確保

### 1. 車輪径設定誤差

車輪径を設定し、円周の長さと同転数から走行距離を演算  
⇒車輪径の設定を誤ると危険側動作

#### (対策)

車輪径設定後に、定められた区間を走行し位置検知誤差を測定し、車輪径の妥当性を判断  
( $L$ と $L'$ の長さを比較し妥当性を評価)



# 車上位位置検知における安全確保

## 速度発電機による走行距離算出時の安全確保

### 2. 滑走・空転対策

車輪の空転、滑走が発生すると危険側動作

#### (対策)

#### ①速度発電機の取付位置

非駆動軸への取付、ブレーキ力を弱める

#### ②空転・滑走の検知と補正

加速度の変化を監視し、空転・滑走の検知

加速度の変化をベースにソフト的に補正処理

# 車上位位置検知における安全確保

## 距離積算誤差に対する安全確保

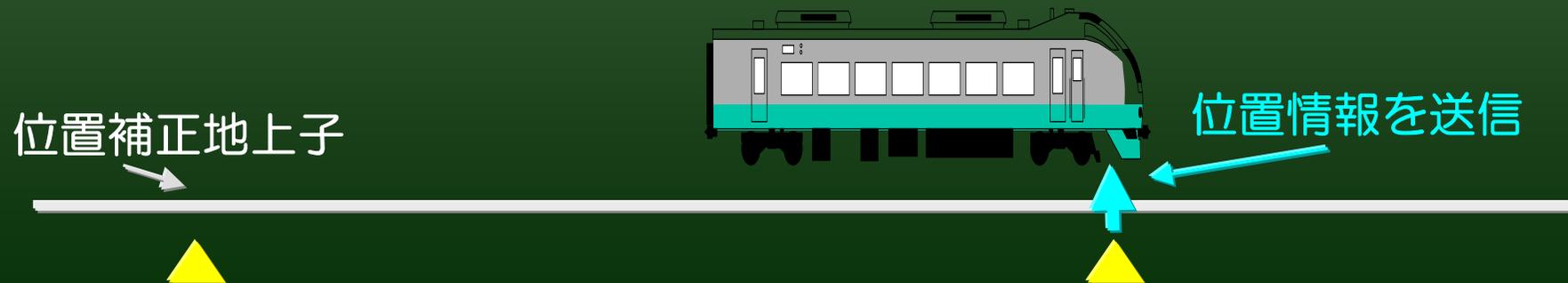
### 1. 地上子による位置補正

小さな位置検知誤差が積算すれば危険側動作

#### (対策)

一定距離ごと、厳しい精度が必要な個所に位置情報を補正する地上子を設置

補正量が一定値を超えるとブレーキ制御



# 車上位置検知における安全確保

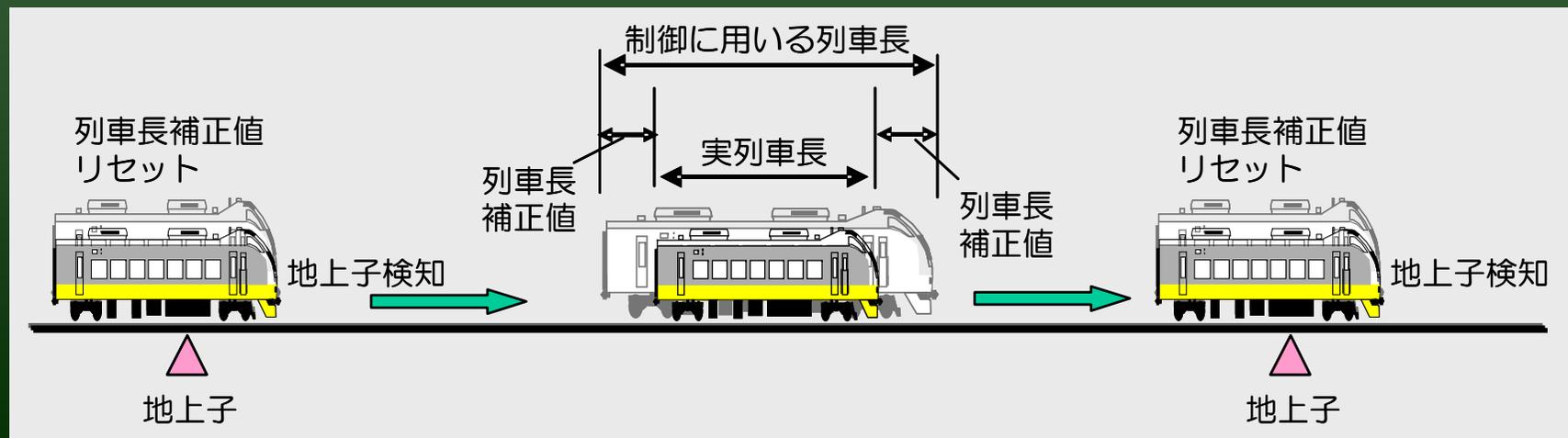
## 距離積算誤差に対する安全確保

### 2. 列車長の補正

距離積算誤差が累積すると、システムが把握している位置と実在の列車位置との違いが発生する

#### (対策)

列車長位置補正点からの積算距離に対して、一定の割合の長さを列車長の前後に加える



# 車上位位置検知における安全確保

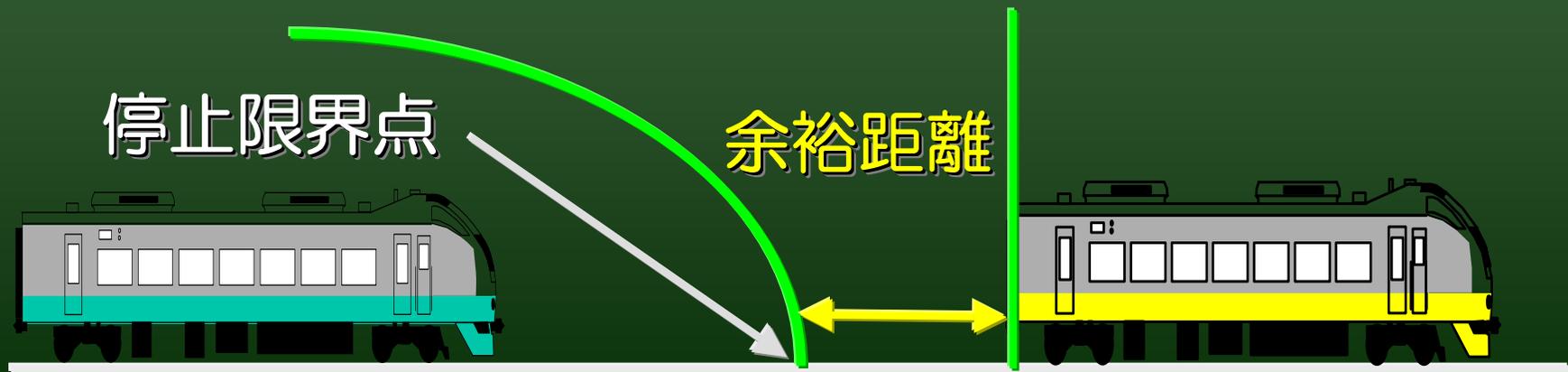
## 距離積算誤差に対する安全確保

### 3. 余裕距離の確保

距離積算誤差の対策で防止できない誤差が発生すると危険  
側動作の可能性

#### (対策)

余裕距離を設定し防止できない誤差を吸収



# システム異常時における安全確保

## 異常が発生した瞬間の安全対策

1. 合理性チェック
2. 列車位置不定発生時
3. 列車分離発生時
4. 通信断発生時
5. 流転・非搭載車進入時

## 異常時から正常時への回復処理における安全対策

- ・ 在線管理機能（ATACSの特徴的機能）

# システム異常時における安全確保

## 異常が発生した瞬間の安全対策

### 1. 合理性チェック機能

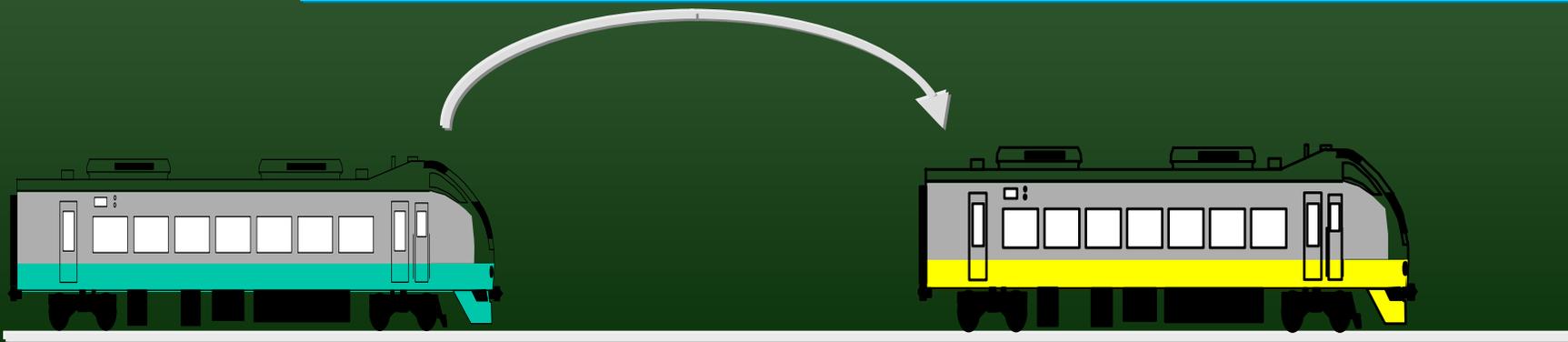
走行速度変化、列車位置情報の変化、加速度の変化、列車長の変化などを監視し、明らかに異常な変化を検知した場合には安全側処理を行う

(例)

列車位置が短時間で大きく変化  
(例) 1秒間で1km移動



合理性チェックで  
異常判定 → 緊急停止

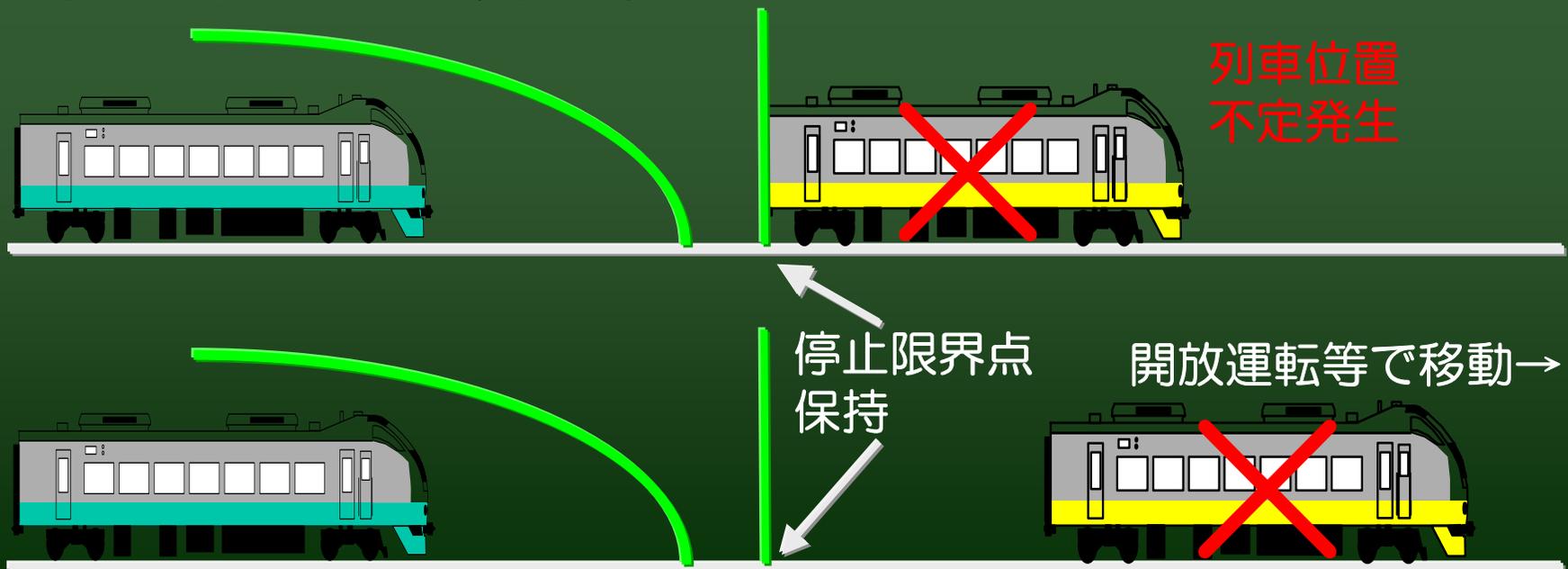


# システム異常時における安全確保

## 異常が発生した瞬間の安全対策

### 2. 列車位置不定発生時

車上制御装置の故障などにより列車の位置が不定となった場合、故障発生時の列車位置を地上装置が保持し、後続列車への安全を確保する。

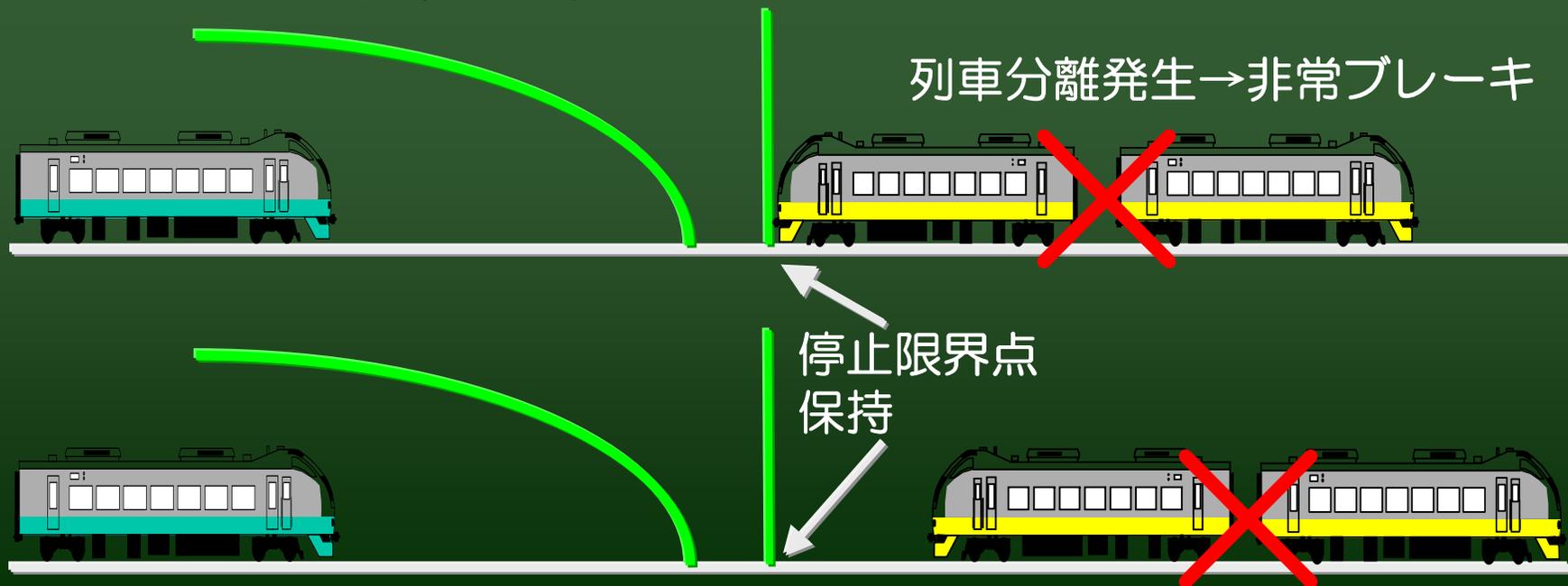


# システム異常時における安全確保

## 異常が発生した瞬間の安全対策

### 3. 列車分離発生時

列車分離を検知すると、当該列車に緊急停止指示を出すとともに、列車分離発生時の列車位置を保持し、後続列車への安全を確保する。



# システム異常時における安全確保

## 異常が発生した瞬間の安全対策

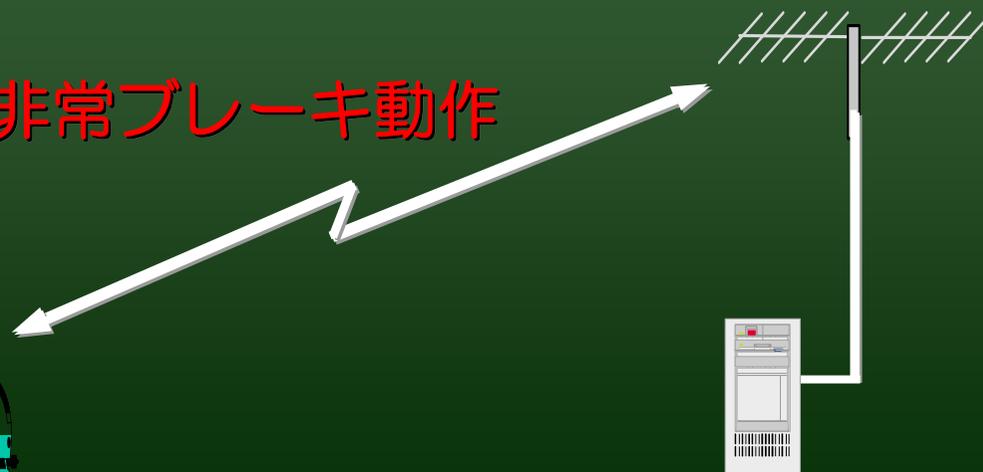
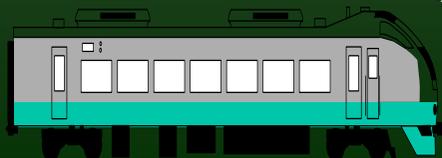
### 4. 通信断発生時

3秒以上の通信断が発生すると当該列車は非常ブレーキを動作させる。

⇒車上制御装置が緊急停止情報を受信できない、地上装置が認識する列車位置と実列車の位置が増大する等が理由

約1秒周期で通信

**3回連続通信断で非常ブレーキ動作**

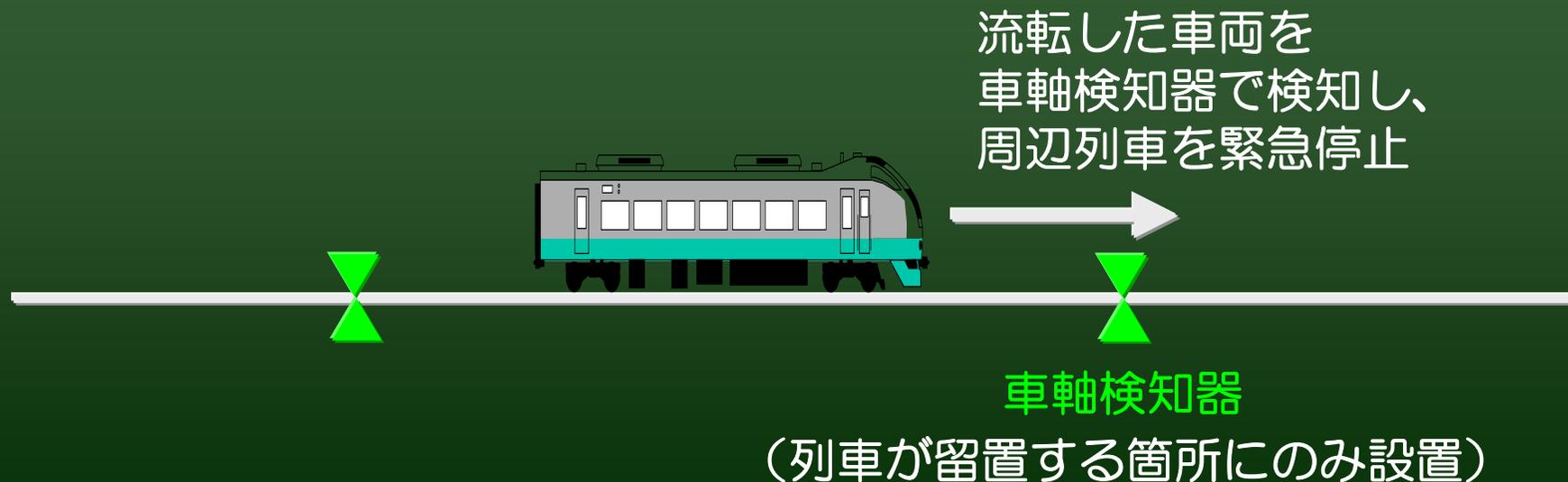


# システム異常時における安全確保

## 異常が発生した瞬間の安全対策

### 5. 流転・非搭載車搭載時

車上装置の電源がOFFの列車が動き出したり（流転）、  
車上装置非搭載車（故障車含む）がシステムに進出した  
場合は地上装置が正しい列車位置を把握できなくなるため、  
周辺列車を緊急停止させる。

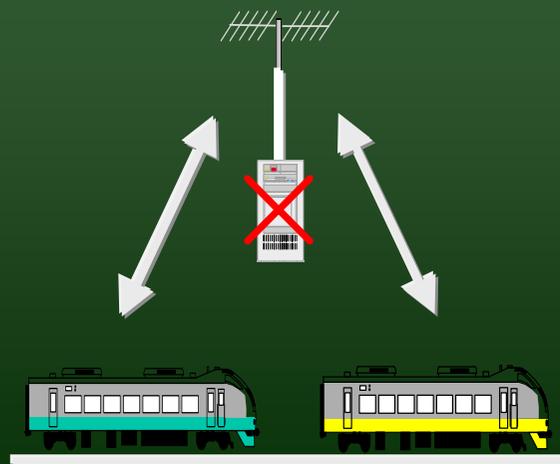


# システム異常時における安全確保

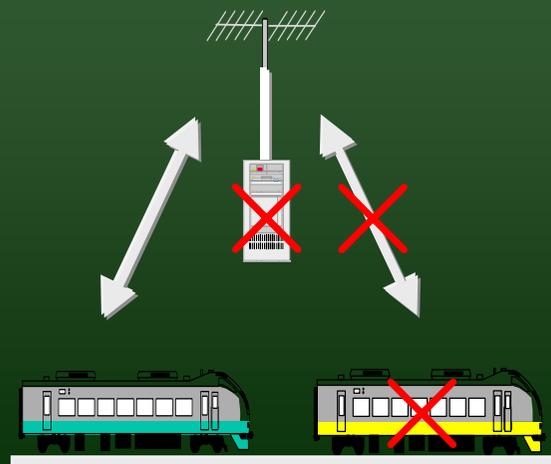
## 異常時から正常時への回復処理における安全対策

- ・ 在線管理機能（ATACSの特徴的機能）  
軌道回路がないシステムの最も危険な故障モードは以下の状況である。

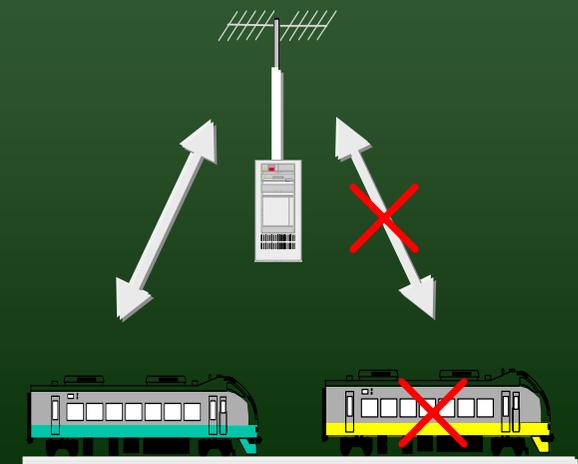
(1) 地上装置ダウン



(2) 地上装置ダウン  
車上装置ダウン



(3) 地上装置が復帰しても  
車上装置ダウン列車を  
補足出来ない  
→危険側制御



# システム異常時における安全確保

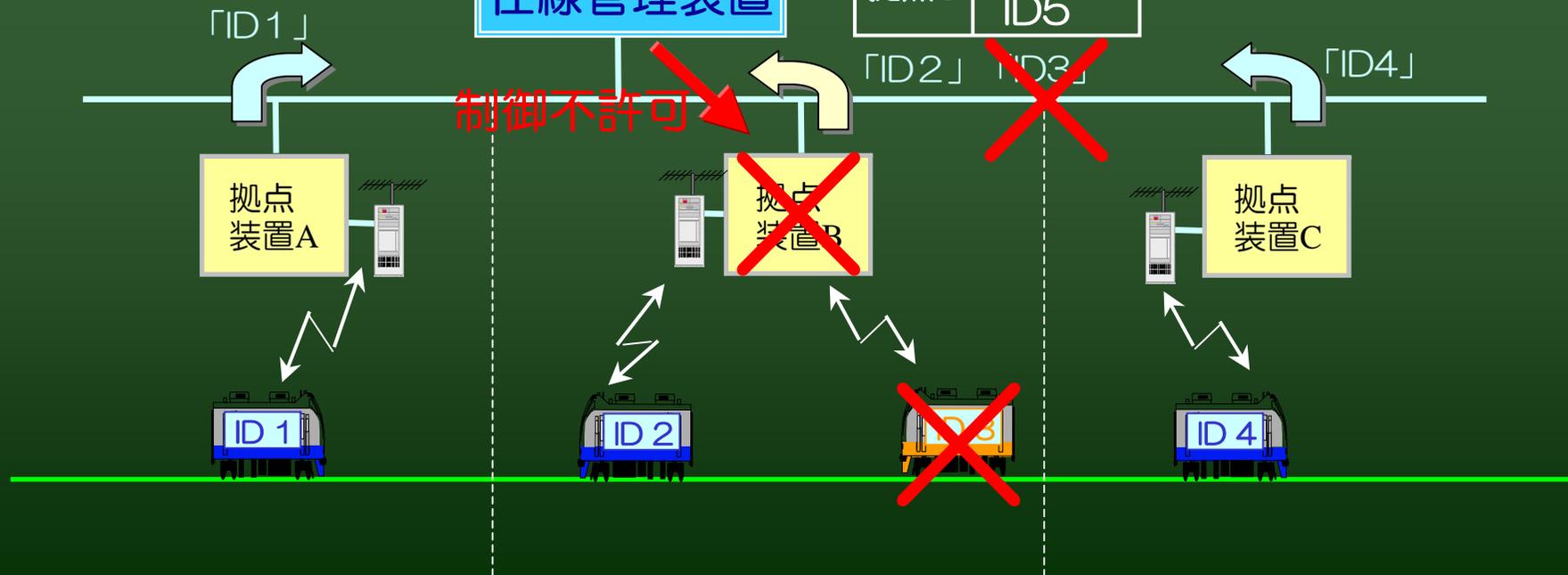
## 異常時から正常時への回復処理における安全対策

### 具体的な対策

システム内に在線する  
列車IDを管理する装置

在線管理装置

拠点A	ID 1
拠点B	ID 2
	ID 3
拠点C	ID 4
	ID 5



# その他

---

## ハードウェア

⇒フェールセーフが要求される装置はすでに実績のある装置を使用する。新規に開発する装置は極力使用しない。

## ソフトウェア

⇒JIS C 0508-3に準拠して開発

⇒十分な試験を実施

(1)工場内試験

単体試験、組合せ試験（異常時シナリオ試験含む）

(2)現地での現車試験

モニターラン、コントロールラン

\*ソフトウェア主体のシステムであるため、工場内で多くの試験が実施できるのが特徴

仙石線ATACS

# 仙石線ATACS

---

当初の使用開始予定日      2011年3月27日

2011.3.11 東日本大震災発生

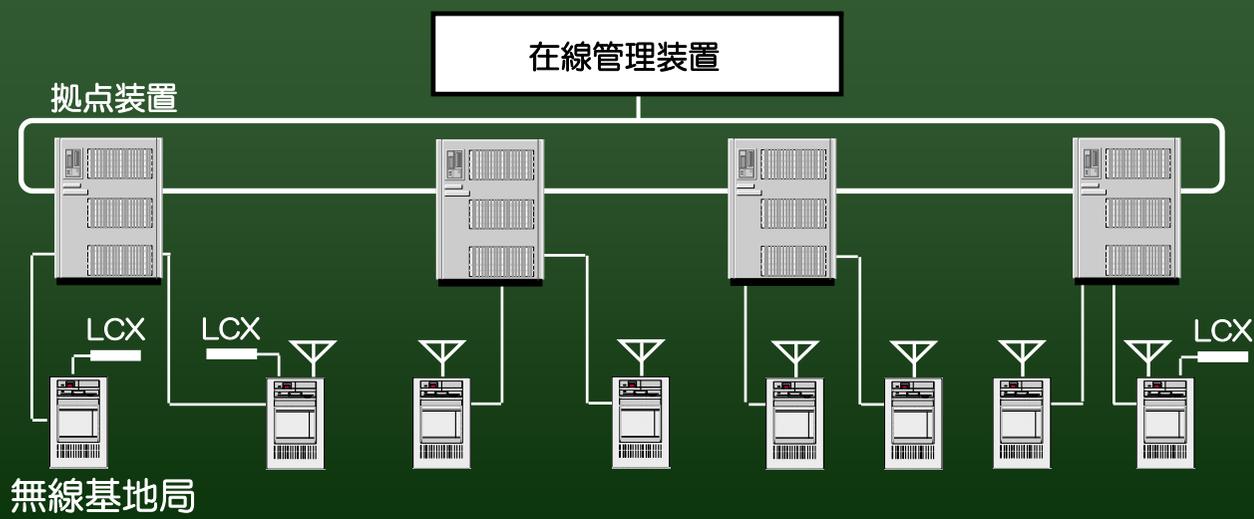
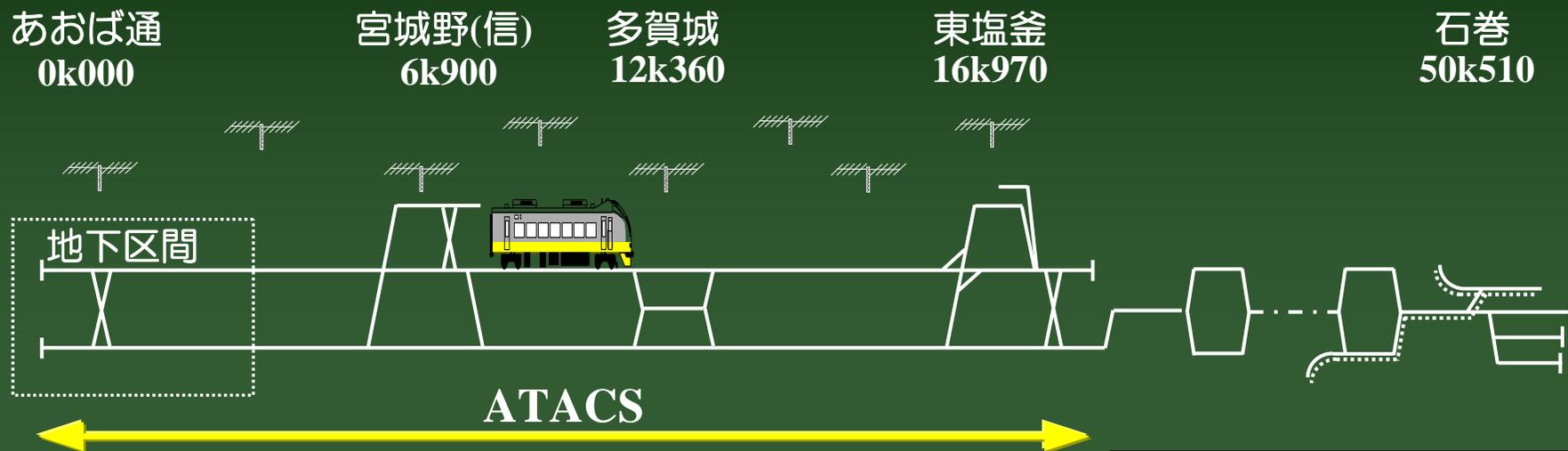
使用開始日      2011年9月25日  
(台風被害復旧優先のため再度延期)



使用開始日      2011年10月10日

現場設備が少ない ⇒ ATACSは災害に強いシステム

# 仙石線ATACSシステム構成図



- 路線長 18km
- 最小運転時隔 5分
- 拠点装置 4台
- 無線基地局 8局
- 編成数 20編成
  - 旅客列車 19編成
  - 検測車 1編成

# 車上システム構成

←あおば通

石巻→

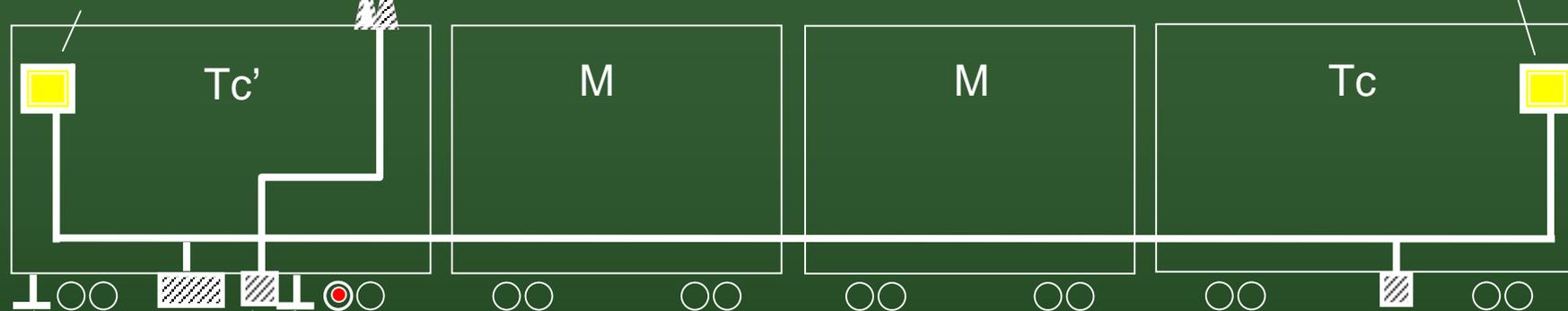
[集中側]

[非集中側]

運転台表示装置  
スイッチ類

アンテナ

運転台表示装置  
スイッチ類



車上子

無線装置

弱め軸、速度発電機

車上制御装置 (非集中箱)

車上制御装置 (集中箱)

# 車上設備



パターン接近表示灯 (橙色)  
パターン接近  
車内進行信号 (緑色▽) (▽位置により速度の制御情報を表示する)  
車内停止信号 (赤色▼)  
入換表示灯 (橙色)  
入換  
車内停止信号 (赤色×)

故障情報	運転情報	要因	メニュー
ATACS	停止限界 754m 宮城野(信)	05/09/13 12:13	
非常運転	1000	入換 × P接近	
パターン低減	500	速度 90 km/h	
無信号	0	制御速度 95 km/h	
		緊急停止受信	
転動防止			
EB			
8			
7			
6			
5			
4			
	福田町 [下本]	12k890m	
	停車	各停	
		試1234S	

# 仙石線ATACS使用開始後の実績

2011年10月10日～2012年10月9日の1年間の実績値  
(総走行距離150万km、制御電文送信総数2.2億回)

	評価項目	目標値	実績値	評価
システム全体	システム稼働率	99.99%以上	99.99998%	○
車上位位置検知	システム異常検知 (合理性チェック異常警報)	0件	0件	○
	位置補正地上子通過回数	3,317,400回(エラーなし)		○
	システム進入・進出	各19,000回(エラーなし)		○
無線品質	ビット誤り率	$1 \times 10^{-4}$ 以下	$1 \times 10^{-7}$ 以下	○
	フレーム受信率	99.9%以上	99.9987%	○
	ハンドオーバー (無線基地局互り)	509,800回(エラーなし)		○

# 海外の無線による列車制御システム

# 海外の類似システム

---

## ERTMS/ETCS (European Railway Traffic Management System /European Train Control System)

ヨーロッパにおいて、EU主導で導入が進められている無線を用いた列車制御システムである。機能によりレベル1～レベル3までの構成がある。ATACSはERTMS/ETCSレベル3と類似のシステムである。

## ERTMS Regional

ヨーロッパにおいて、開発が進められているローカル線向けの無線を用いた列車制御システムである。スウェーデンで実用化されている。

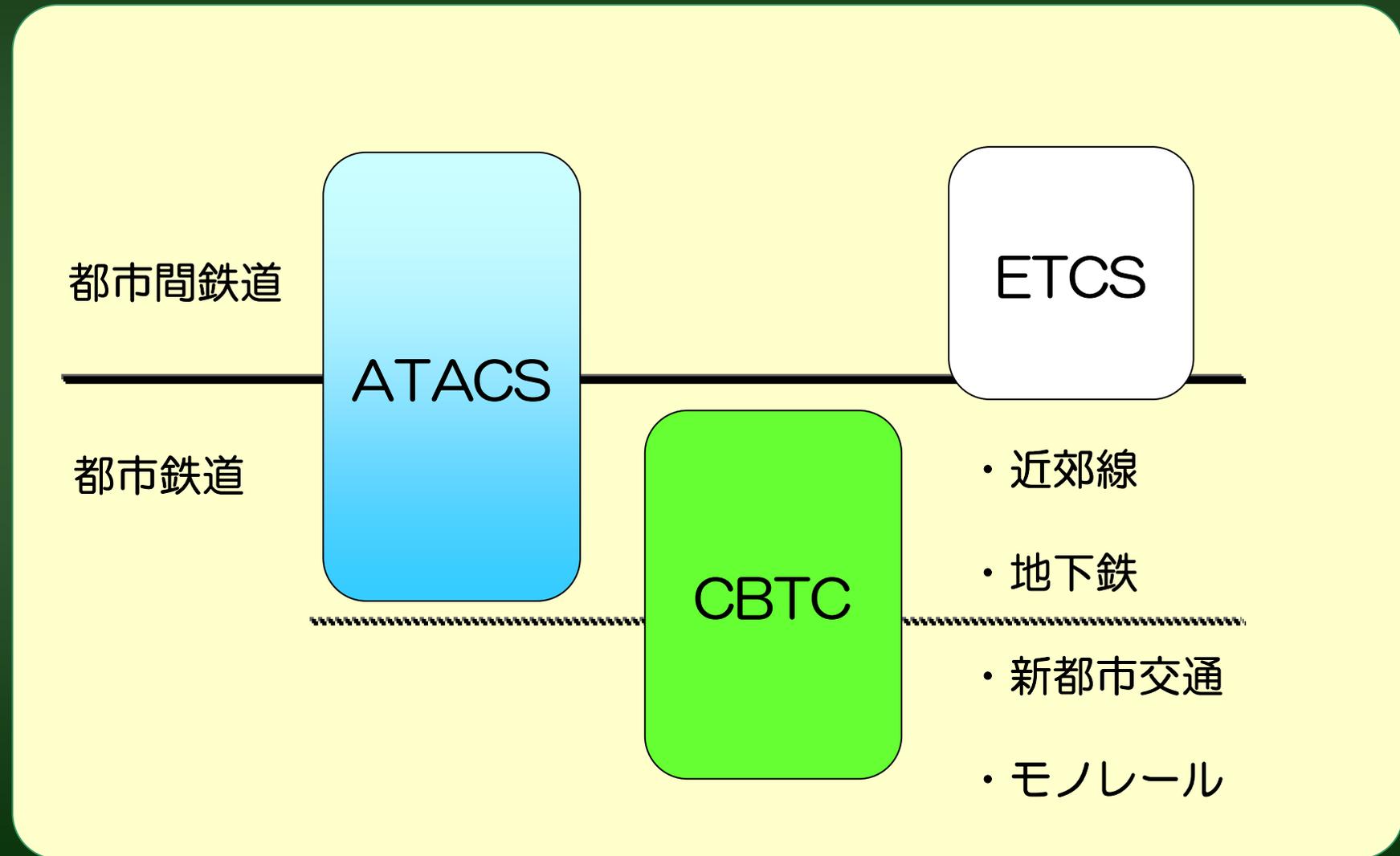
## CBTC (Communications Based Train Control)

地下鉄等の都市鉄道を中心に世界各地で導入が進められている無線を用いた列車制御システムである。（無線は2.4GHzのWi-Fiが中心）

## PTC (Positive Train Control)

北米で開発が進められている新しい列車制御システムである。

# 各システムの適用線区の違い

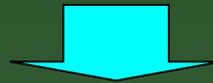


# 無線を用いた列車制御システムの国際規格化動向

2007年3月の国際鉄道連合（UIC）総会において、ヨーロッパがERTMS/ETCSをUIC標準としたいと提案



これに対して日本側が反対



2008年11月のIEC総会において、日本側から無線を用いた列車制御システムに関する国際規格提案

\*内容は、特定のシステムの規格化ではなく無線利用列車制御における無線システムの性能要求決定手順を定めたもの



日本が主導で国際規格化の作業を実施

(IEC/TC9/PT62773 主査 エキスパート JR東日本 松本部長 交通研 田代室長等)



ATACS実用化の経験を反映