

計測標準フォーラム第16回講演会

鉄鋼業における温度計測

～ 放射温度計は生産現場でどのように使われるか ～

2018年9月27日

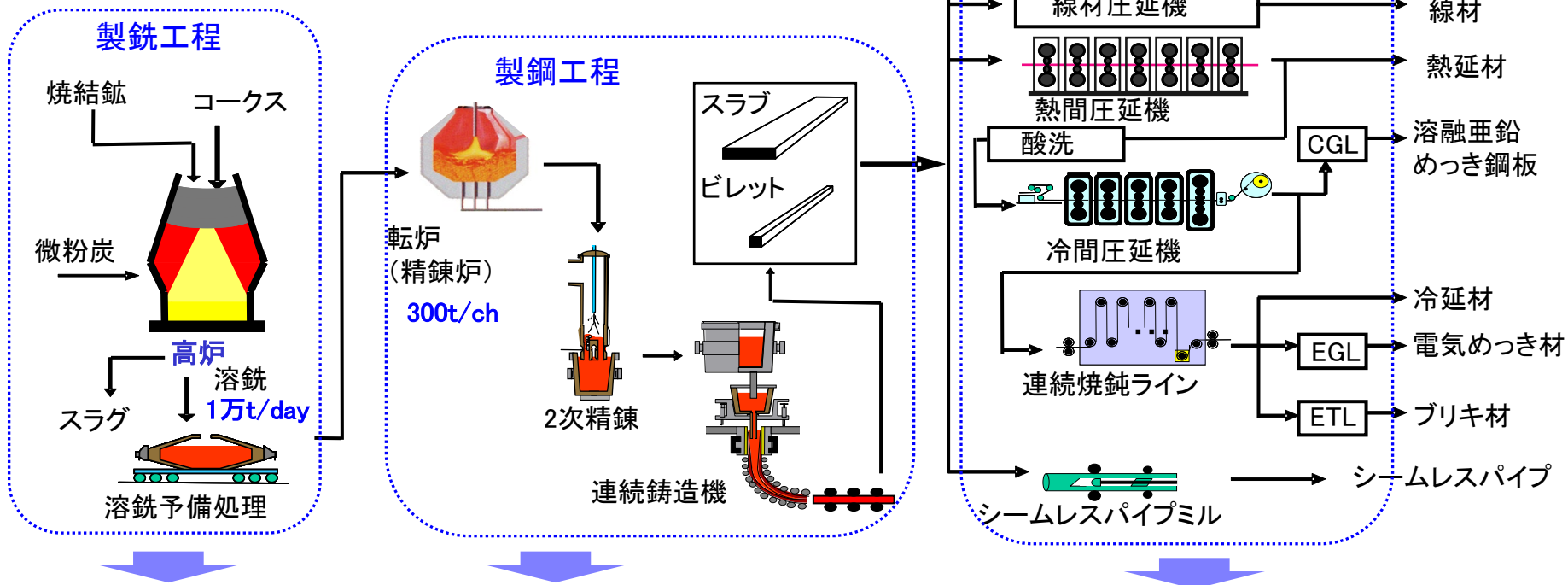
東京ビッグサイト

新日鐵住金(株)

杉浦 雅人

鉄鋼製造プロセス

- 原料から最終製品までの長大な製造工程。
- 巨大な生産設備と複雑なダイナミクス
加熱・冷却の繰返し。物理・化学・冶金現象が混在。



大量の溶けた鉄を扱う設備(他産業にはない)
 ・市販センサのみではプロセス把握困難 ⇒ 計測技術の研究開発
 ・生産現場の経験的知識では限界 ⇒ 制御・データ解析

・巨大かつ高速ラインのプロセス制御・異常診断
 ・製品の材質作り込み。
 ⇒ 自社開発のセンサ・制御・ソフトウェア

使われる温度計

➤ 接触式測定・・・(主には)熱電対温度計

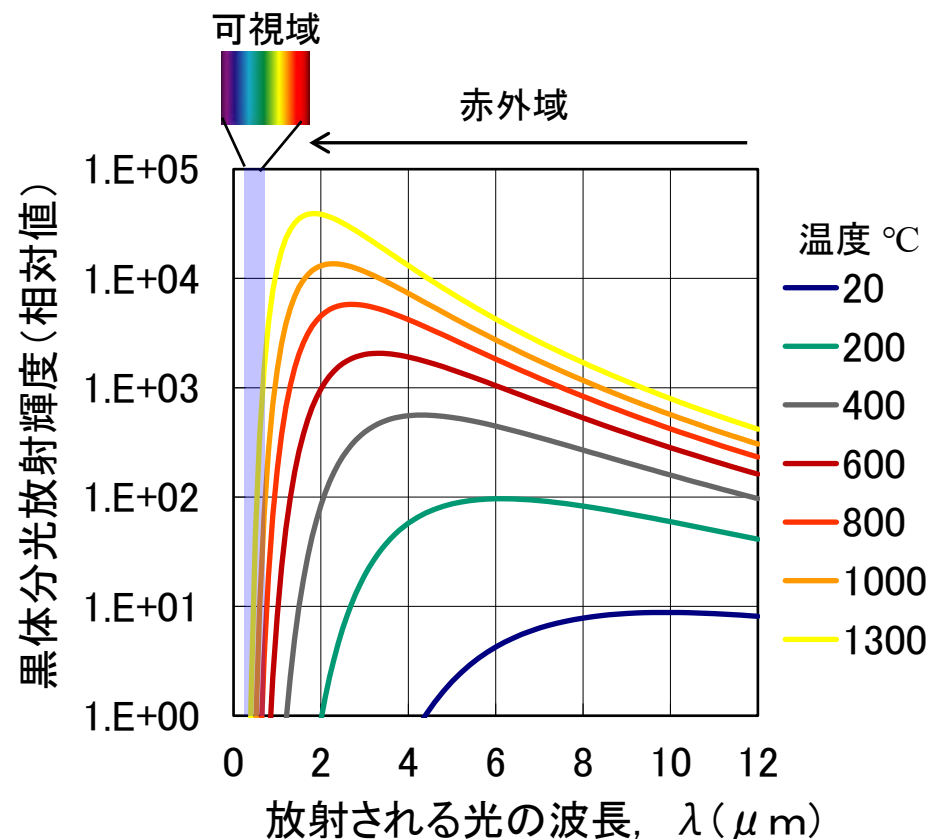
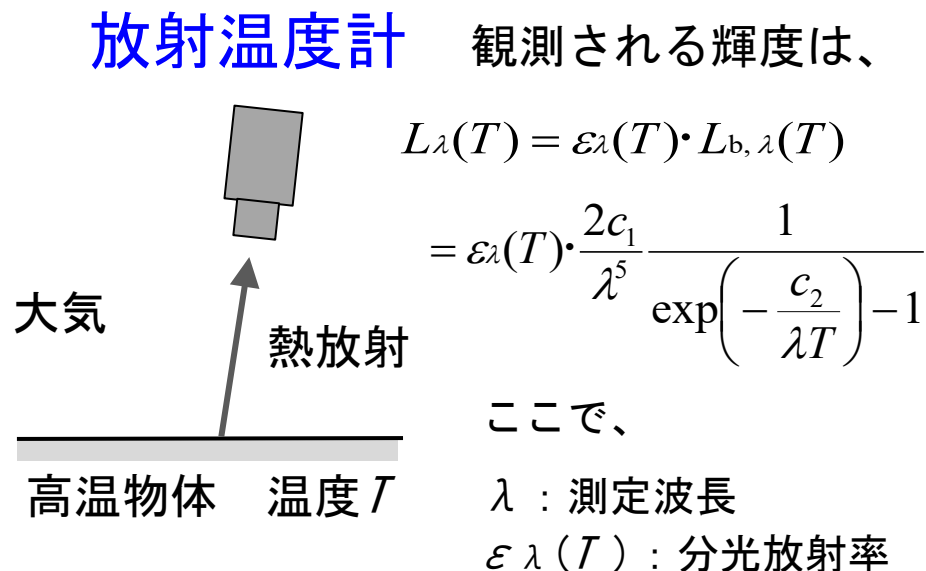
- 設備の温度モニタリング。
- 加熱炉・熱処理炉の温度制御。
- 使い捨て熱電対プローブによる溶融鉄の测温。

➤ 非接触式測定・・・放射温度計

＜放射测温法の特徴＞

- 加熱された鋼材が発する熱放射を検知する温度計測。
 - 高速測定が可能で、熱じょう乱を起こさない。
 - 信頼性の高い温度計測には、課題の克服が必要。
- 搬送ラインを移動する加熱された鋼材。
 - 温度分布が必要な対象。

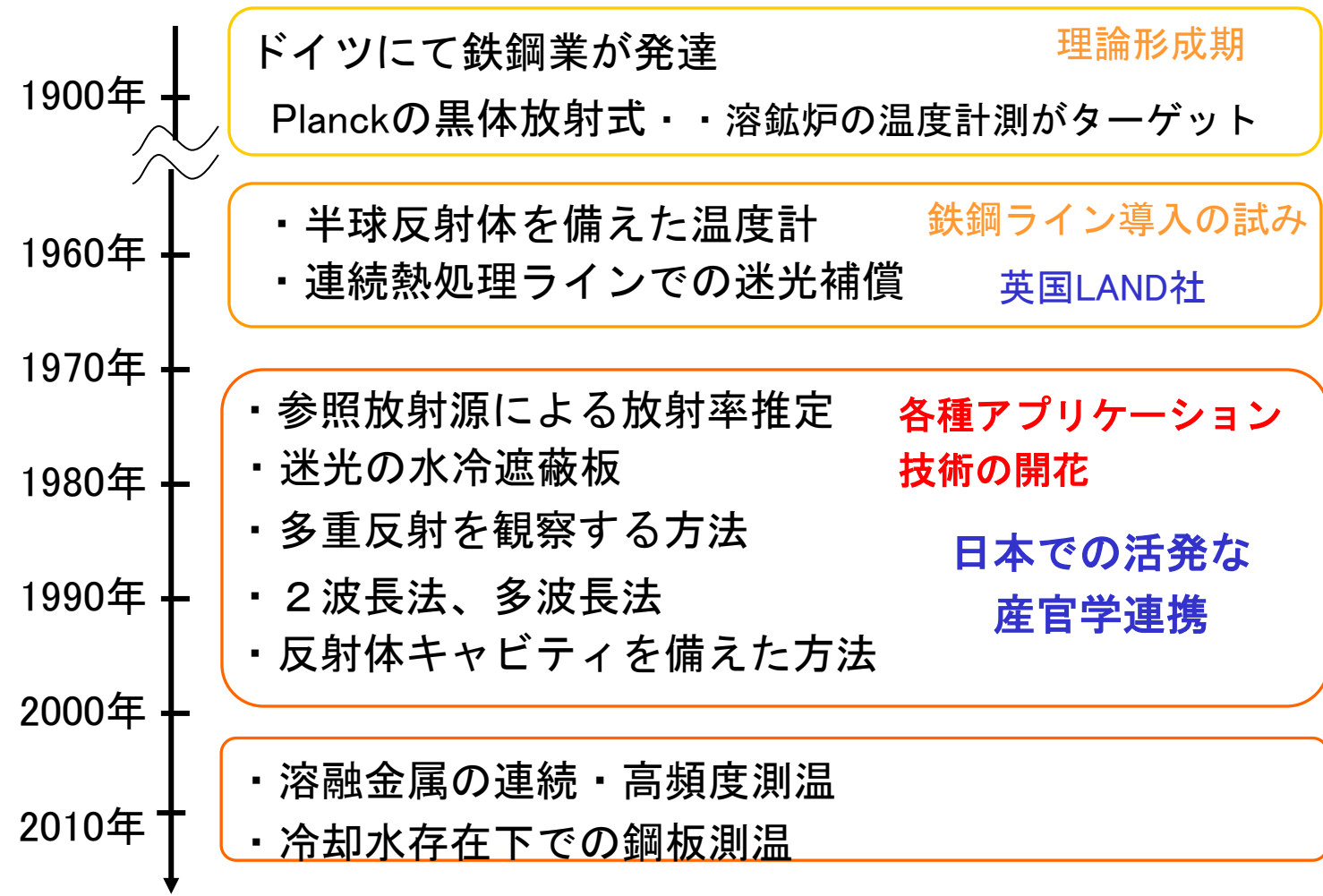
放射温度計の測定原理



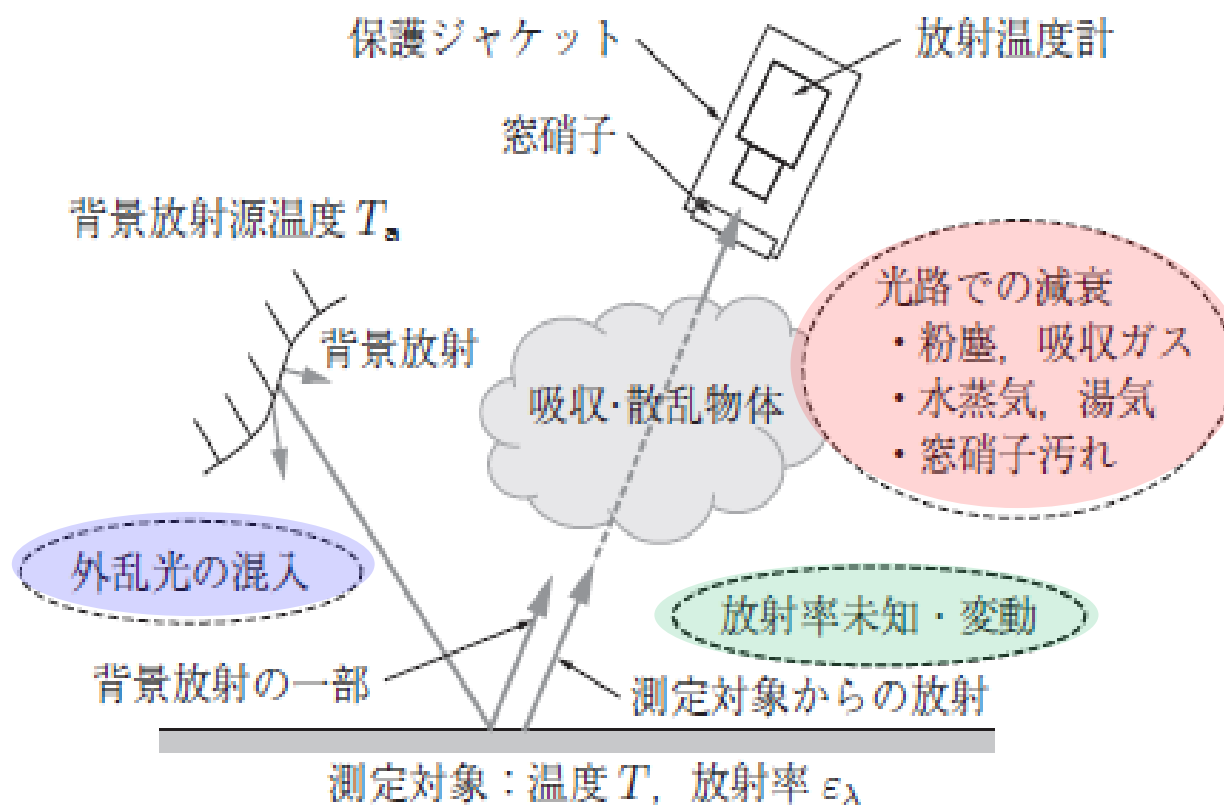
黒体（理想的な放射体）でなければ、
 温度 T と放射率 ε の2つの未知数がある。

➡ ε を予め把握しておき、 L_{λ} を観測して T を求める。

鉄鋼業の放射測温の研究開発の歴史



放射測温の実用上の課題



$$L_\lambda = (1 - \alpha_\lambda) \{ \epsilon_\lambda L_{b,\lambda}(T) + \beta(1 - \epsilon_\lambda) L_{b,\lambda}(T_a) \}$$

α_λ : 分光吸収係数、 β : 背景放射が混入する割合

計測自動制御学会 温度計測部会編:「温度計測 -基礎と応用-」より

米国の放射測温専門書^{※1}の記述
Typical Problems in Steel Mills

(1) Physical Damage

- ・ Crane hooks or crane loads, several tons of material swinging, can easily destroy a valuable thermometer.
- ・ "Stepping stones" for maintenance personnel . . .
- ・ Weld spatter, burning sparks, common steel mill activities . . . , can pit lenses and protective windows .

(2) Water

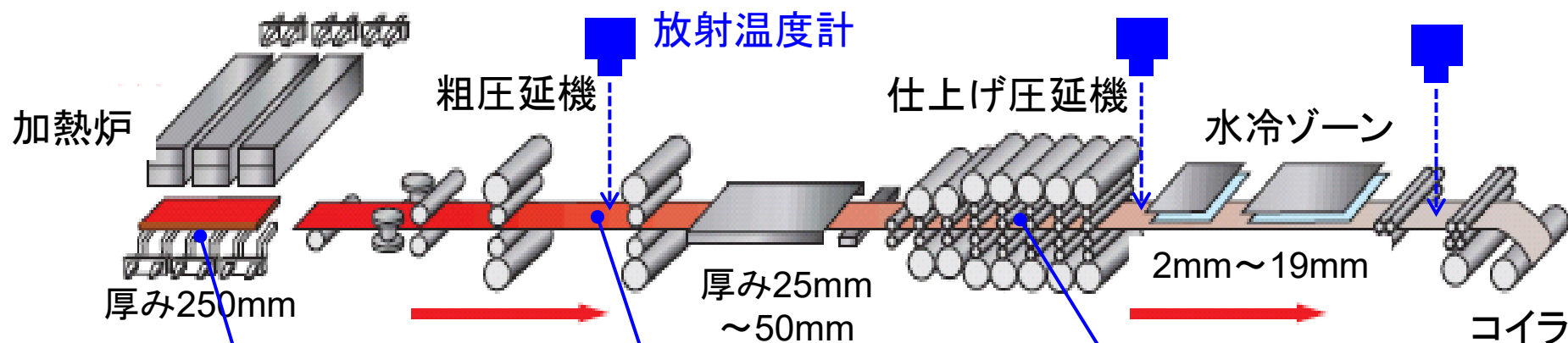
(3) Vibration

(4) Ambient Temperature

※1 : D. P. DeWitt, Gene D. Nutter, Theory and Practice of Radiation Thermometry, JOHN WILEY & SONS, INC.,(1988)

熱間圧延ラインの例

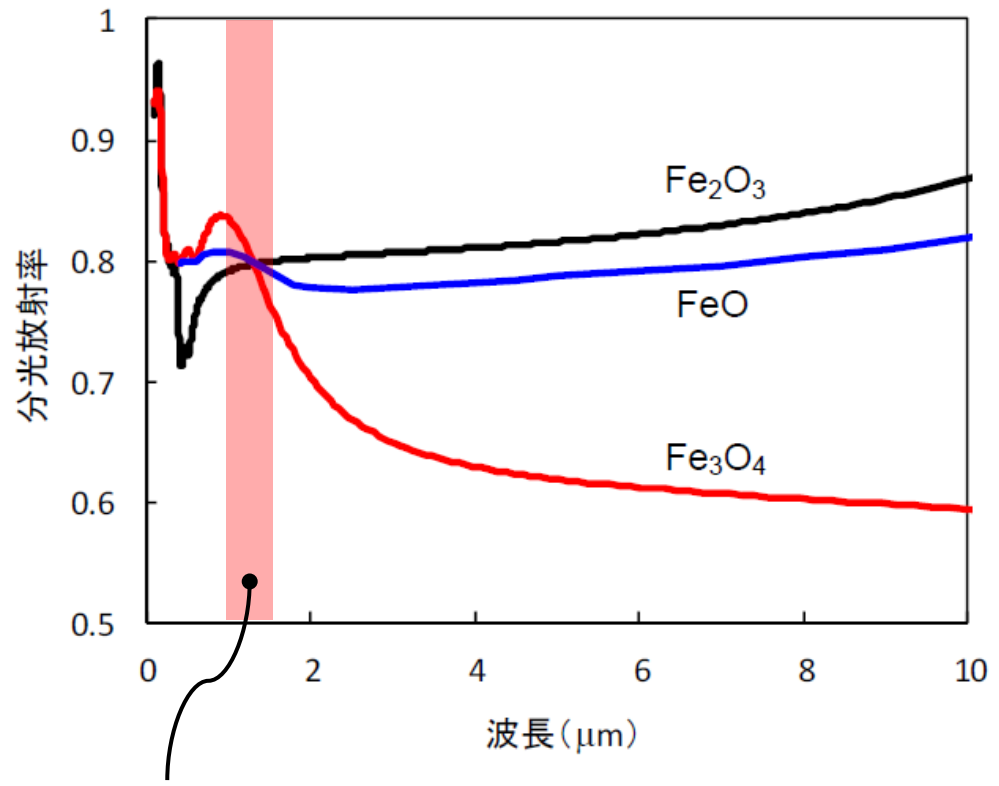
- 加熱温度1200°C、圧延温度1000~800°C、水冷した後巻き取り。
- 最大速度25m/sで板厚精度数10 μ m、金属組織の作り込み。



圧延機前後に設置される放射温度計

- ・対象温度：800～1200℃程度
- ・測定波長：
0.9 μm (Si素子)、
1.55 μm (InGaAs素子)
- ・測定距離：5～10m
- ・放射率：0.8程度

複素屈折率データから計算される
鉄酸化物の分光垂直放射率



<赤熱鋼材の表面状態>

酸化膜 (FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄)

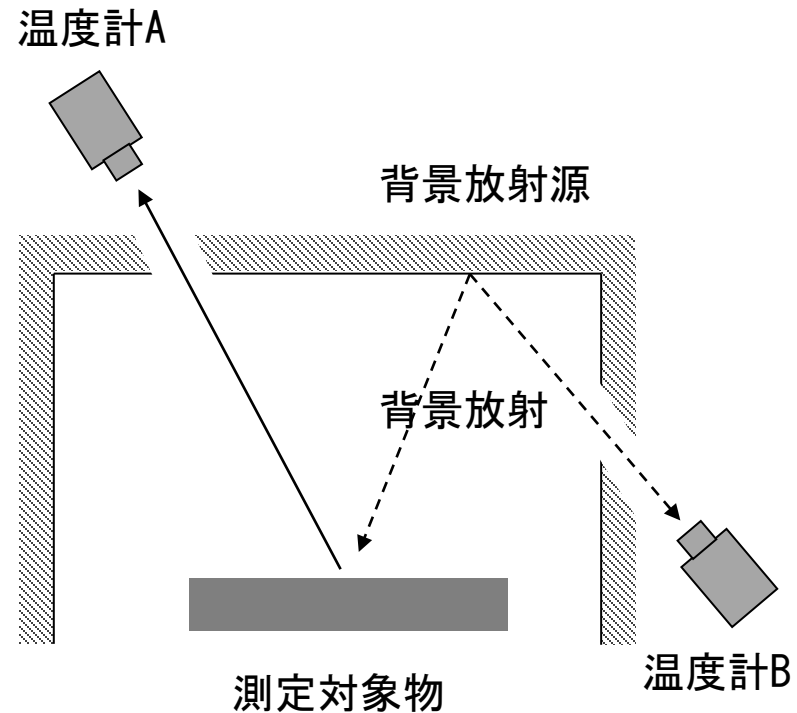
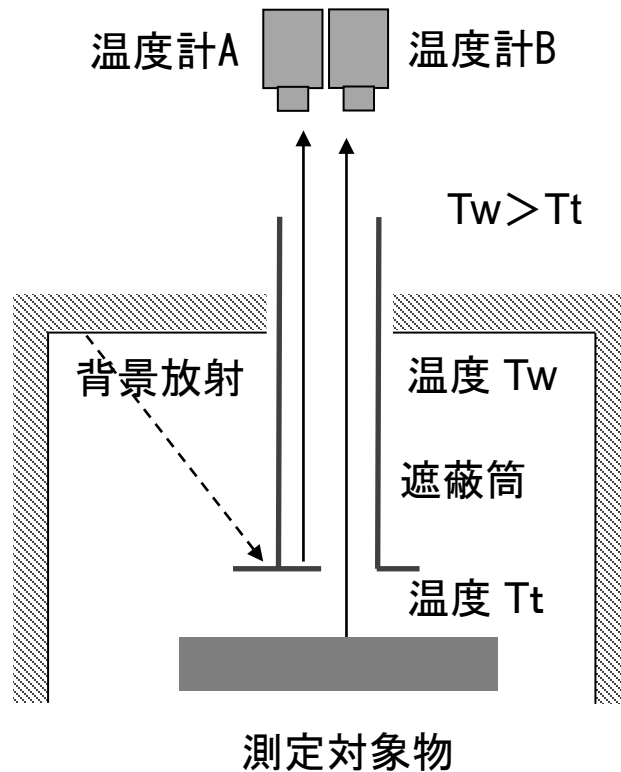
↑↓ 数μm～数十μm



酸化膜の組成・構造によらず安定

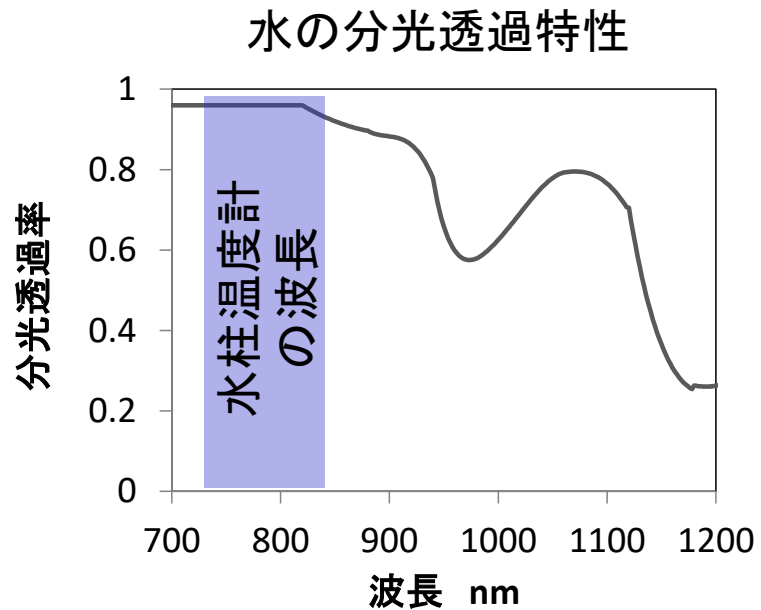
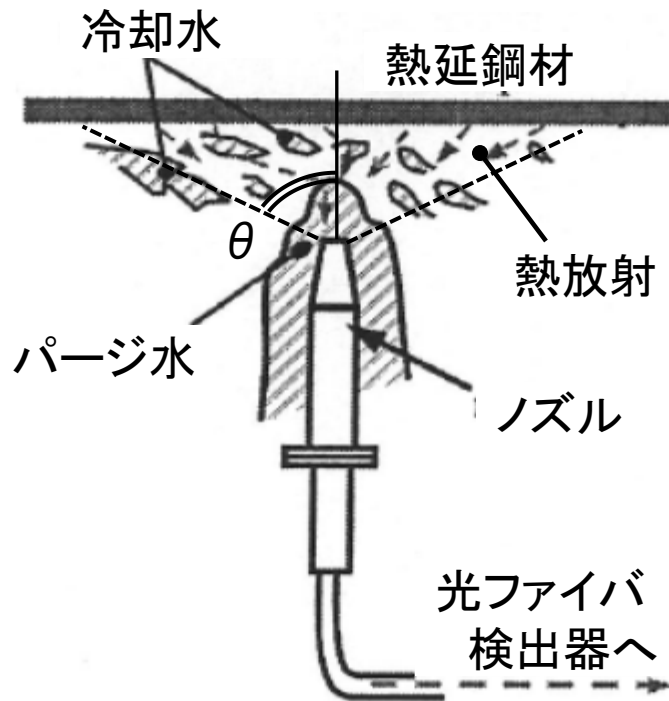
加熱炉内の鋼材の測温

- 対象より高温の炉壁・バーナ火炎に囲まれている(強烈な背景放射が外乱)。
- 燃烧ガスの放射がない特定波長 $3.9\mu\text{m}$ を用いる。
- 下図のように炉壁からの放射は遮蔽・補償(別の温度計を用意)する。



冷却帯の水が飛散する状況での測温

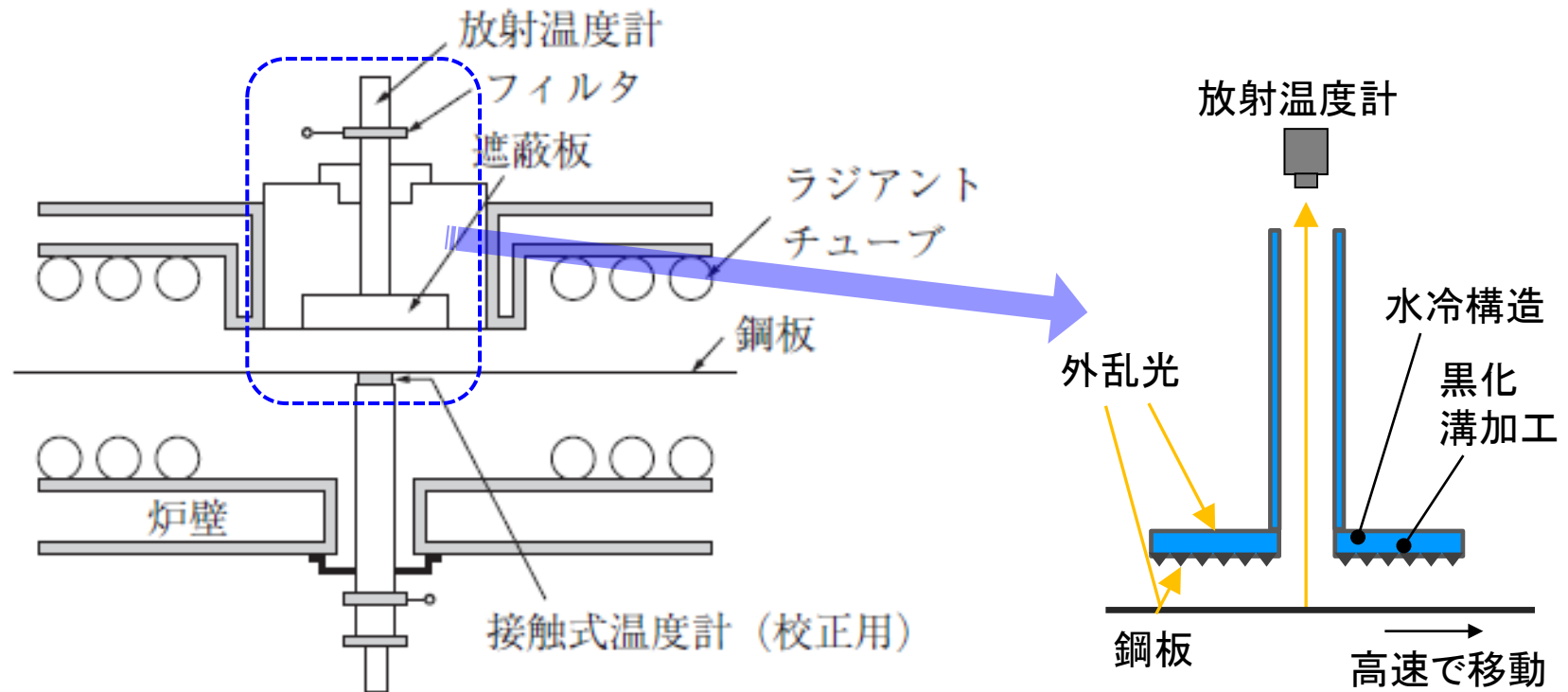
- 水冷帯内は大量の水が滴下・飛散する環境。
- 光ファイバ放射温度計の受光部をライン下部に設置して、観察光路に水柱を形成する(水柱は鋼板に接しない高さ)。
- 水の透明性が高い波長を使用して放射測温を行う。



計測自動制御学会 温度計測部会編:「温度計測-基礎と応用-」より

連続焼鈍ラインでの放射測温

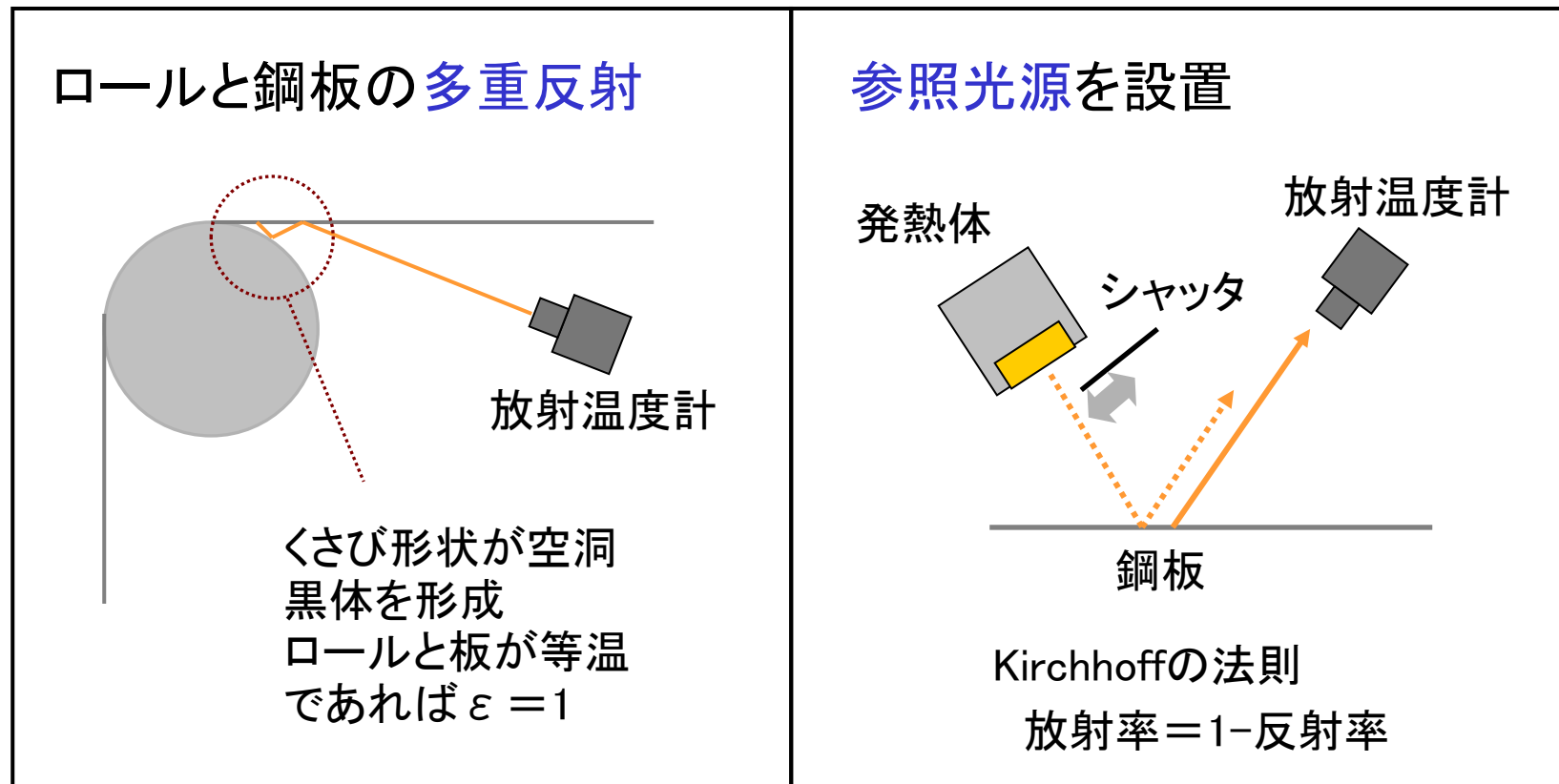
- 連続焼鈍炉では、数km の長さの鋼板を高速で搬送しながら熱処理する。
- 無酸化雰囲気炉内では、測定対象の鋼材の放射率が低く、なおかつ鋼板の温度より周囲の熱源や炉の内壁の温度のほうが高い。
- 背景放射の混入を防止する水冷遮蔽板を組み合わせて放射温度計を設置。



計測自動制御学会 温度計測部会編:「温度計測—基礎と応用—」より

放射率変動の対策(その1)

- 測定対象の形状的な特徴を使い実効放射率を1に近づける方法。
- 参照光源を用いてオンラインで放射率を把握する方法。



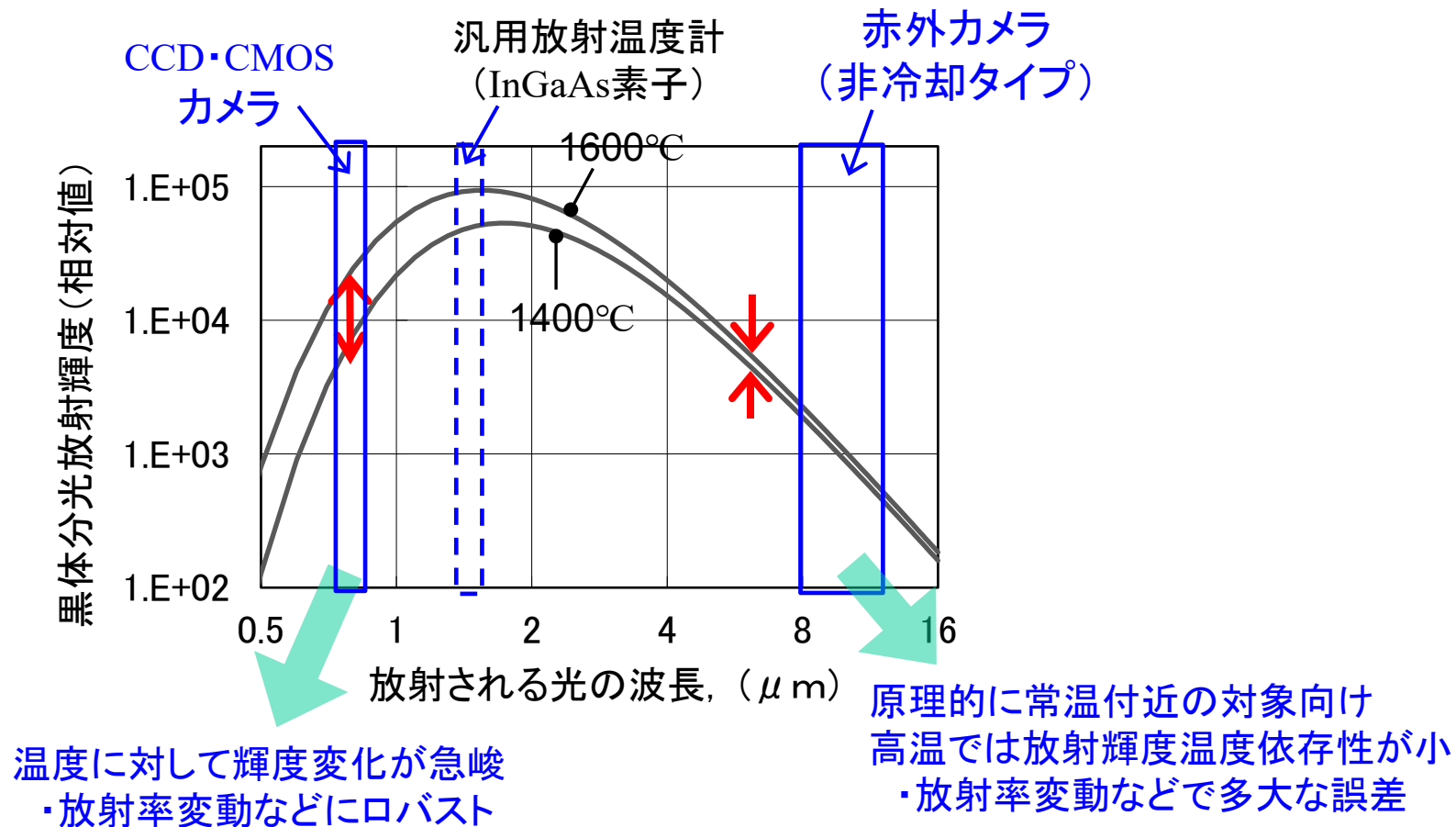
放射率変動の対策(その2)

- 複数の波長で観測することで、付加装置に頼らない受動的方法を
実現する。
- 設置場所の制約が小さく、耐久性・保守性で有利。
- ただし、分光放射率の事前情報が必要。

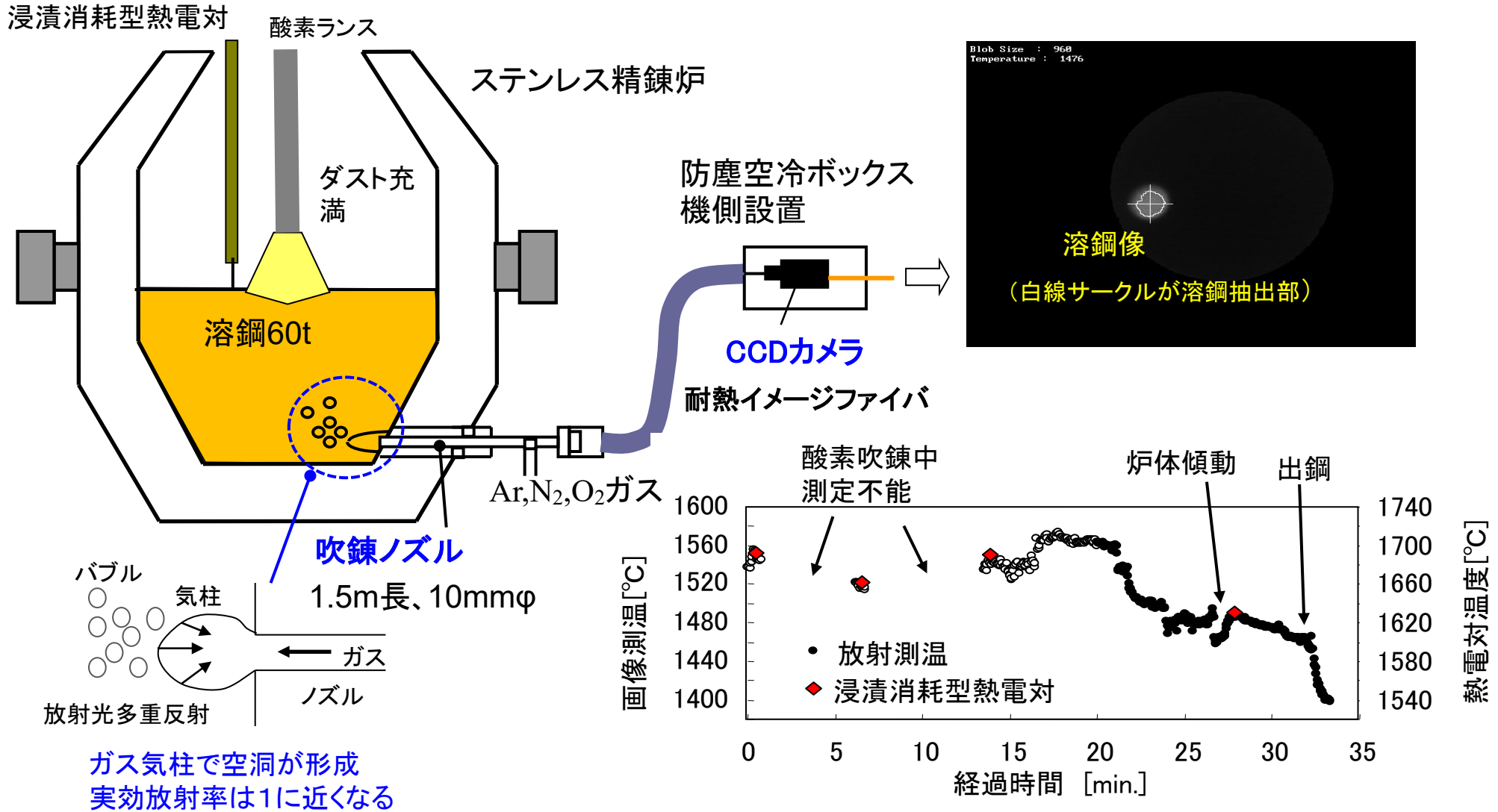
2色法	TRACE法	多色法
<p>2波長の放射率の 比が一定</p> $\varepsilon_1 = R \cdot \varepsilon_2$ <p>R: 定数</p> <p>・鋼板の ε はこれほ ど単純ではない</p>	<p>2波長or2つの偏光で 放射輝度を観測</p> $\varepsilon_1 = f(\varepsilon_2)$ $L_1 = \varepsilon_1 L_b(T)$ $L_2 = \varepsilon_2 L_b(T)$ <p>酸化等の放射率変化に 特化した方法</p>	<p>3つ以上の波長で放 射輝度を観測</p> $F(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3 \dots)$ $= 0$ <p>より複雑な放射率挙動 を狙った方法</p>

画像計測を応用した溶融鉄の温度測定

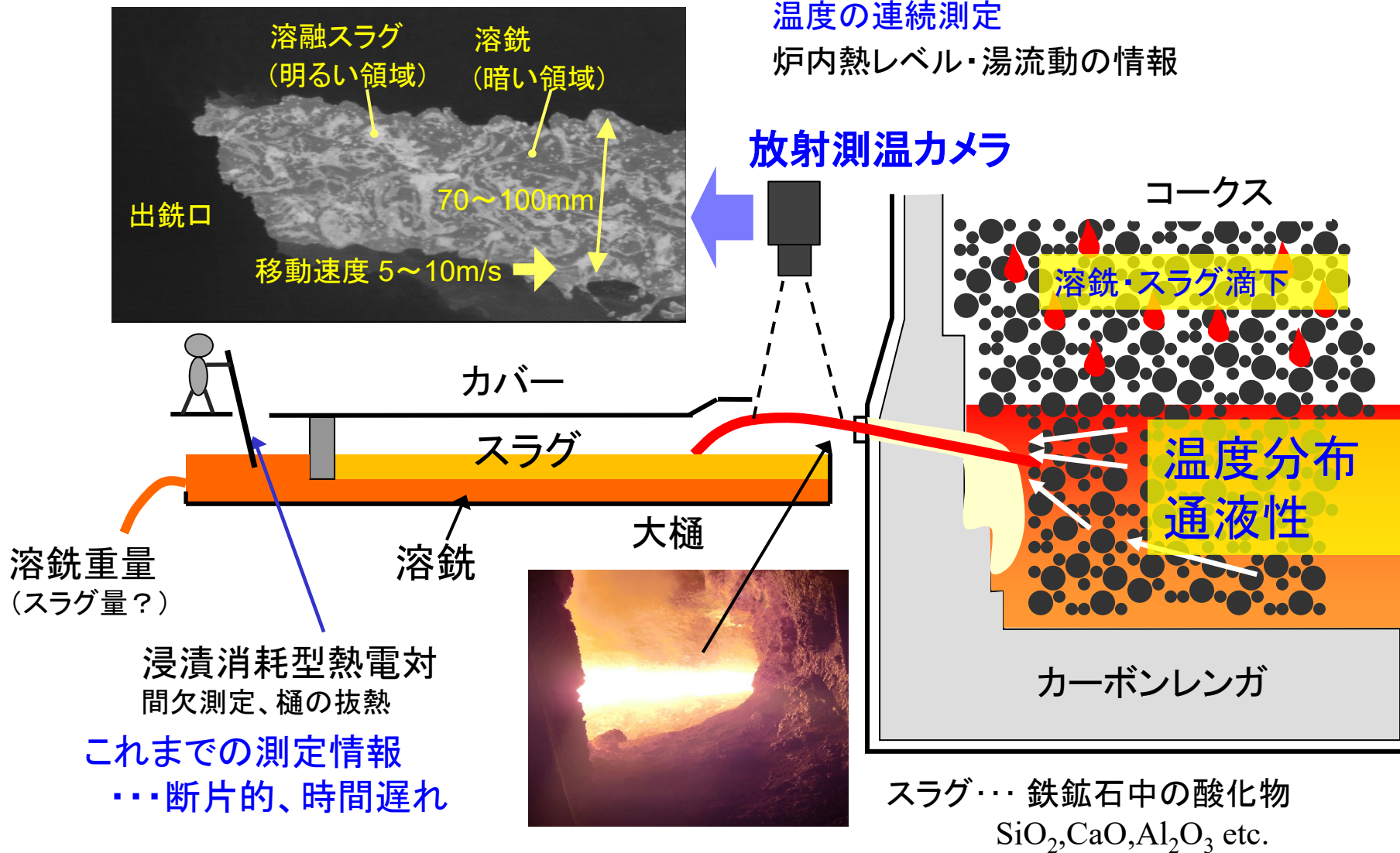
一般的な工業では“非冷却の赤外カメラ”が普及
 しかし、鉄鋼業特有の高温対象では？（黒体放射の波長・温度依存性）



精錬炉内の溶鋼の温度測定

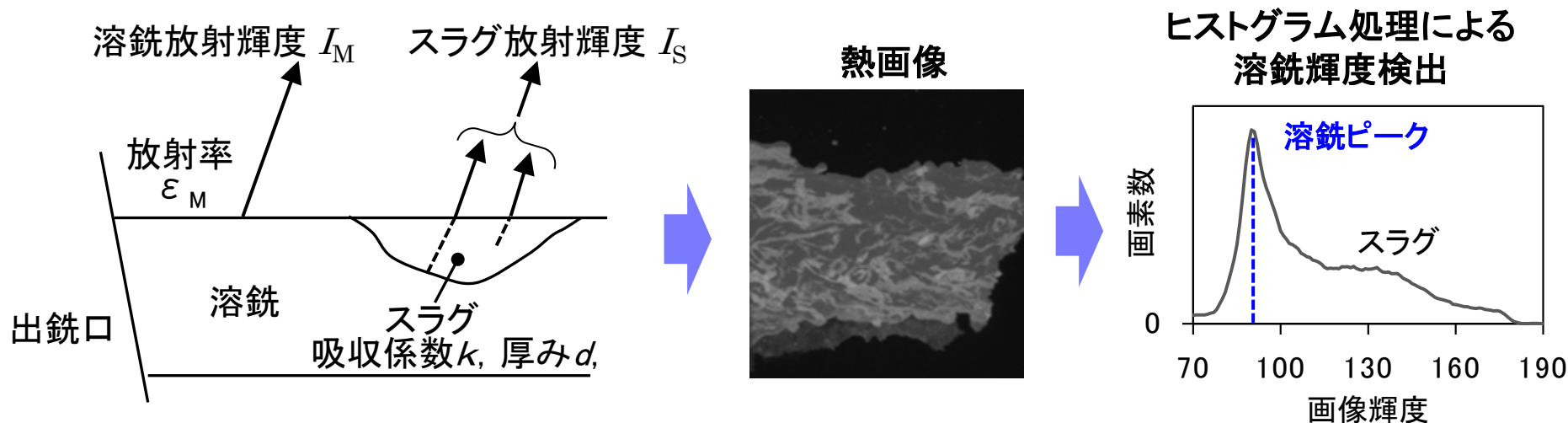


高炉の出鉄流の温度測定



出鉄流の熱画像に基づく測温

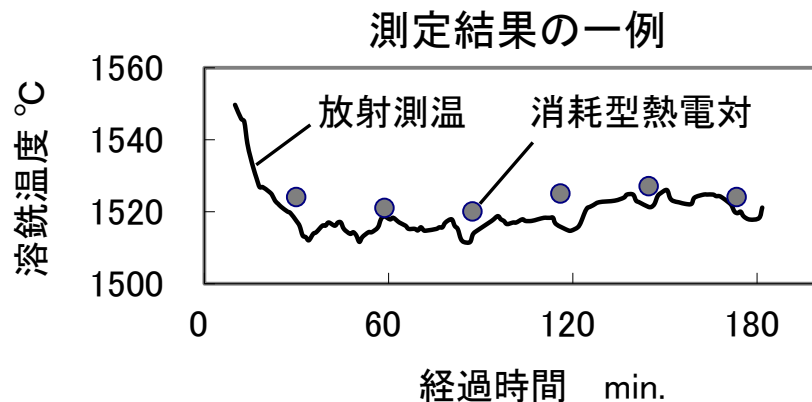
- 出鉄流は、放射率の異なる溶鉄と溶融スラグが未知の割合で混合。
- 画像処理で溶鉄領域の代表輝度を検出して温度を求める。



$$L_M = \varepsilon_M L_b(T)$$

$$L_S = (1 - r)e^{-kd} \cdot \varepsilon_M + (1 - r) \cdot (1 - e^{-kd}) \cdot L_b(T)$$

$L_b(T)$: 温度 T における黒体放射輝度、
 k : スラグの吸収係数、
 r : スラグ・大気界面反射率



鉄鋼業の測温のニーズ

- 鋼板を中心とした測温のさらなる高精度化
 - ①品質厳格化に伴う精度要求
 - ②より低い温度（低い放射率）の測定
- 放射測温法が未確立のプロセスへの挑戦
 - 強い外乱光、光路上の水・粉塵などの外乱
- 温度分布（多次元）計測
 - ①赤外波長域の2次元放射温度計
 - ②材質内部の温度分布情報
- 放射率問題には未解決が多い
 - ①放射率フリーの“理想”放射測温技術
 - ②放射率挙動のさらなる研究

精度・維持管理の重要性

- 本日は特殊環境での放射測温技術を中心に紹介したが、一般的な放射温度計も数多く使われている(一つの製鉄所数百台?)。
 - 安価で簡易的な温度センサ(ICタグ式など)の普及も進んでいて、製造現場のあらゆる計測情報が多量データとして扱われるに時代になりつつある。
 - 温度計ユーザの我々は、現場レベルでの正しい温度計の使用と精度管理の知識が必要。
 - 温度計メーカーには製品のさらなる高精度化(精度向上、出力変動・劣化の低減)を期待。
- ➡ 放射測温法の現場レベルでの不確かさを低減。