

事例紹介 Smart MPC 追加資料

株式会社 Proxima Technology

紹介事例

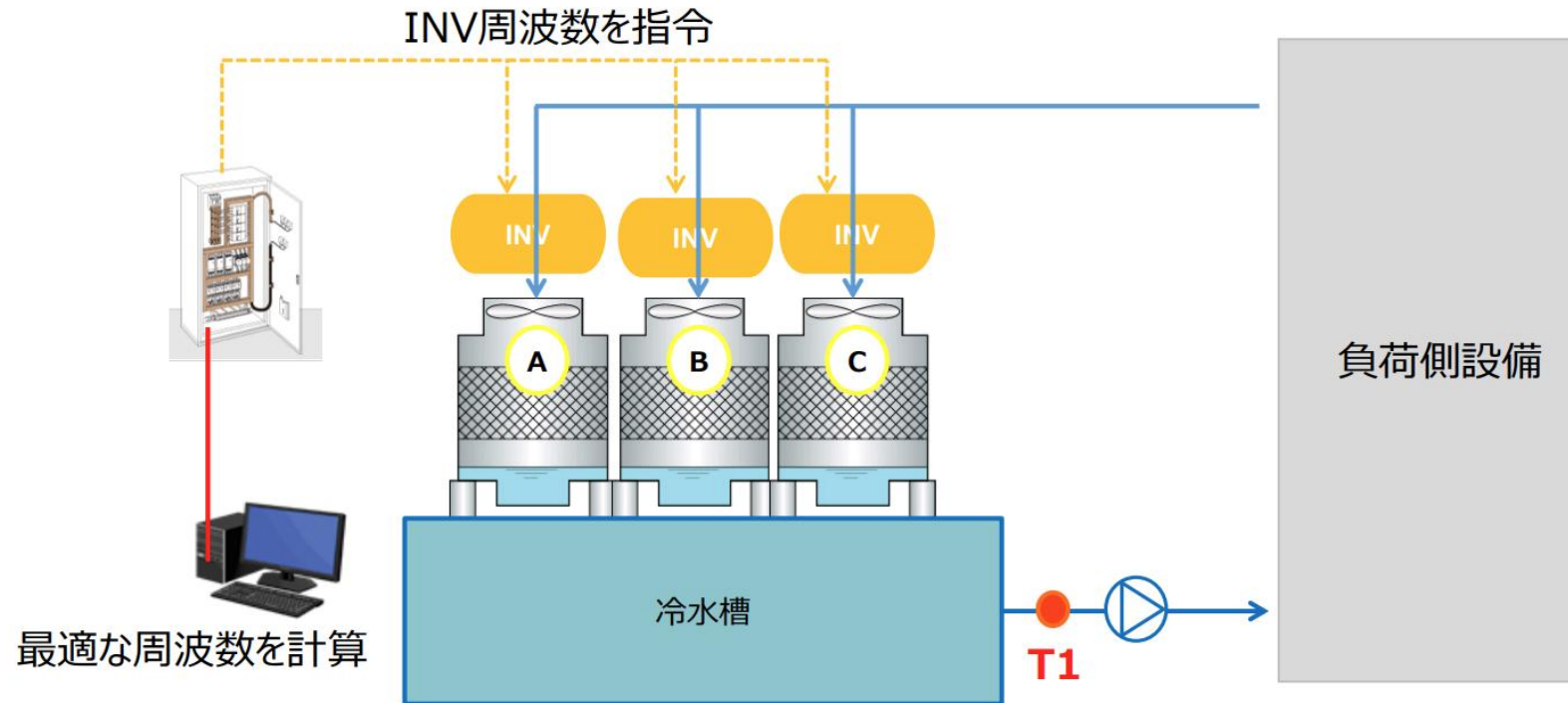
- 冷却塔ファンのインバーター周波数/台数制御（ガス会社）
- ロータリーキルンの温度制御（炉メーカー）
- 製膜スパッタリングプロセスにおけるイオン注入量制御（光学材料メーカー）

冷却塔ファンのインバーター周波数制御 (ガス会社)

背景：冷却塔による水温安定化ニーズ

あらゆる気象状況や負荷状況において冷却水温度(T1)を $\pm 1^{\circ}\text{C}$ に安定させる制御を開発したい

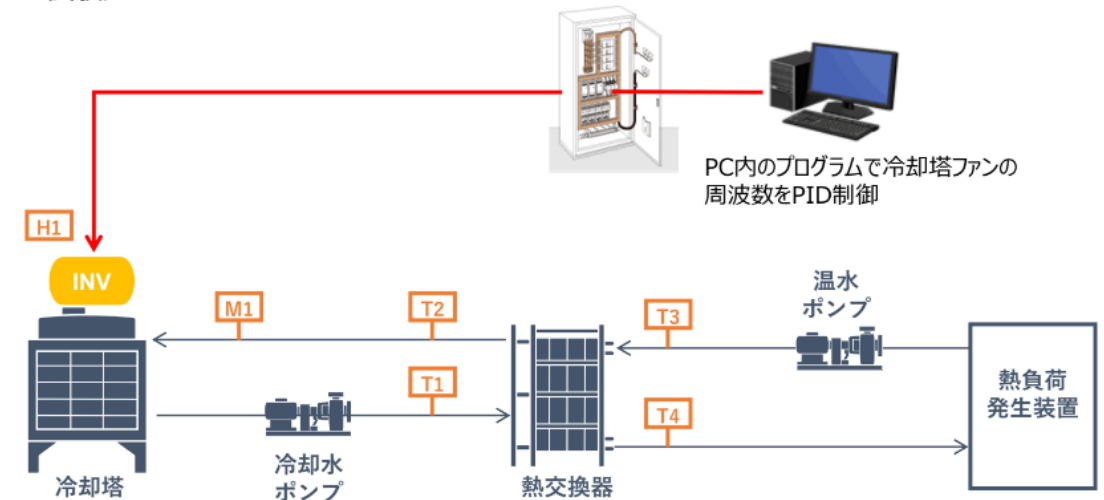
<想定システム>



問題設定

- 利用可能なセンサ値
 - 冷却水往温度 [°C]、冷却水還温度 [°C]、温水往温度 [°C]、温水還温度 [°C]、ブロー弁開閉 [0/1]、電気伝導度 [mS/m]、外気温度 [°C]、外気湿度 [%]
- 制御対象
 - 冷却水往温度 [°C]
- 制御入力
 - ファンINV周波数 [Hz]
- 目的 (検収条件)
 - 熱負荷運転 (バーナー点火) 状態のもと30分以内に冷却水往温度を目標値の ± 1.0 °C以内に制御する
 - 熱負荷停止 (バーナー停止) 状態のもと30分以内に冷却水往温度を目標値の ± 1.0 °C以内に制御する

■試験フロー



■測定データ

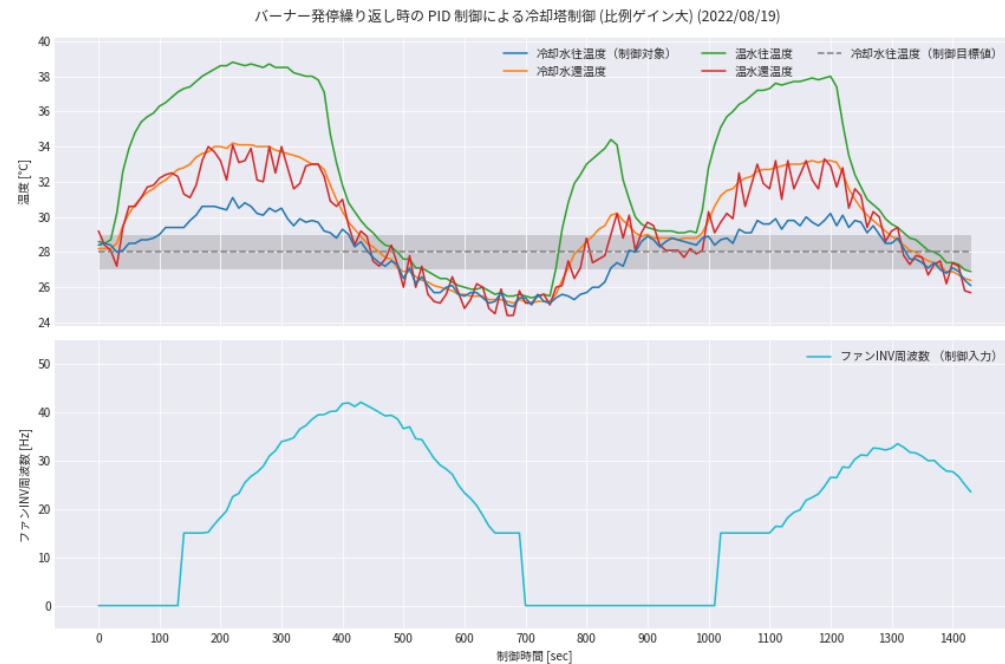
センサー番号	測定項目
T1	冷却水往温度(°C)
T2	冷却水還温度(°C)
T3	温水往温度(°C)
T4	温水還温度(°C)
M1	循環水流量(m3/h)
H1	ファンINV周波数(Hz)

※お送りいただいた
試験フローの説明画像

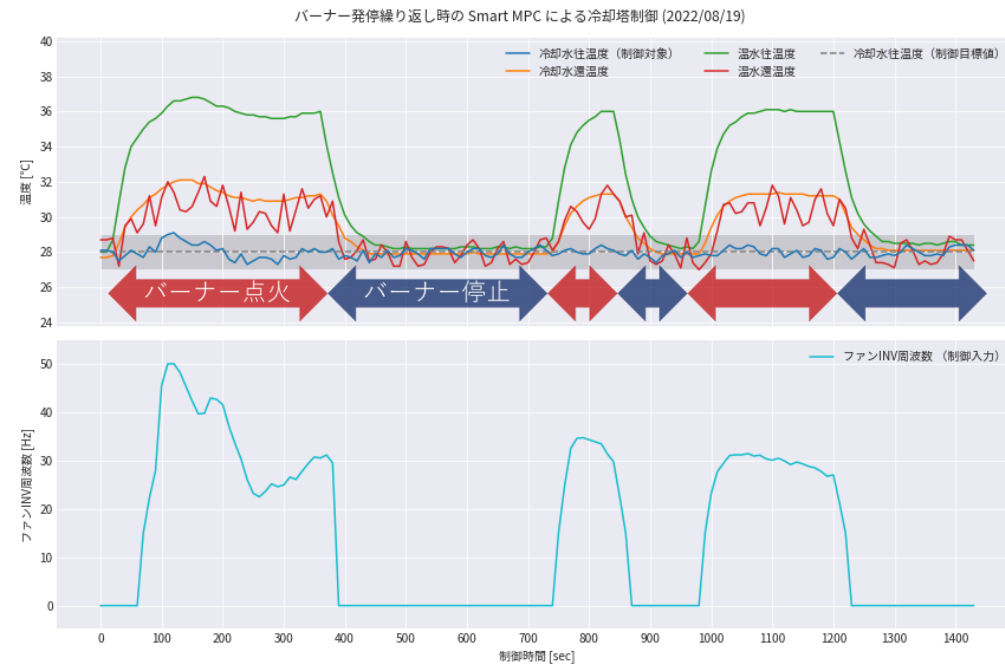
外乱印加時（バーナー発停時）の PID制御とSmart MPCの比較

- バーナーは図のように6分、2分、4分の間隔で点火と停止を繰り返す
- 青線が制御対象である冷却水往温度
- 灰色点線が制御対象の目標値
- 灰色領域が目標値 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ の範囲を示す

PID制御



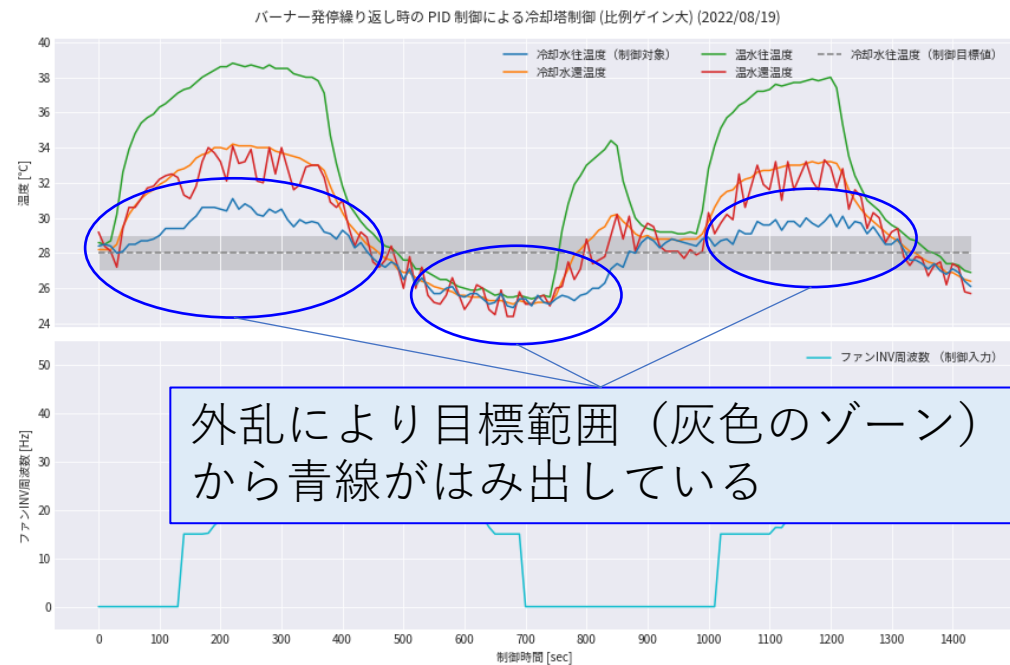
Smart MPC



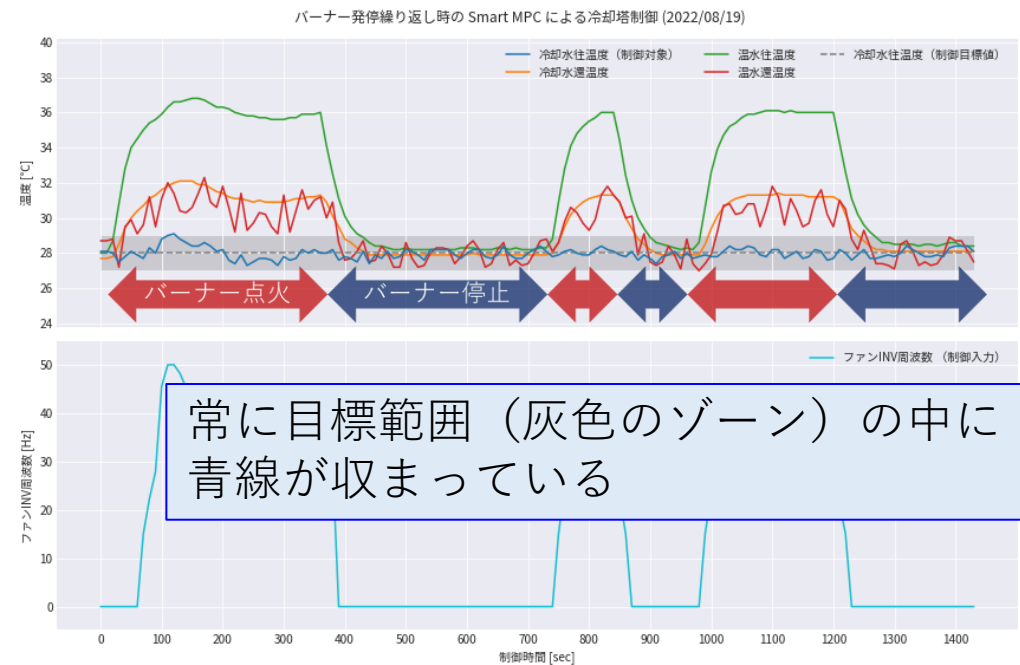
外乱印加時（バーナー発停時）の PID制御とSmart MPCの比較

- バーナーは図のように6分、2分、4分の間隔で点火と停止を繰り返す
- 青線が制御対象である冷却水往温度
- 灰色点線が制御対象の目標値
- 灰色領域が目標値 $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ の範囲を示す

PID制御

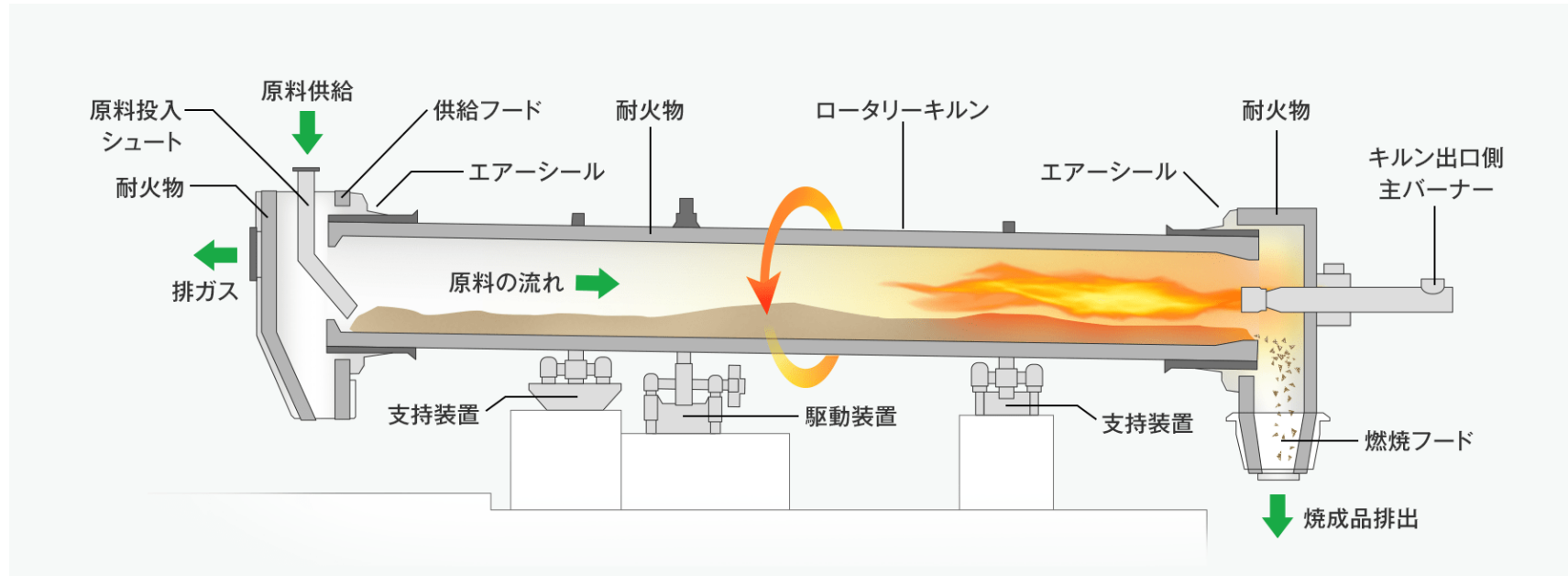


Smart MPC



ロータリーキルンの温度制御（炉メーカー）

ロータリーキルンとは？



ロータリーキルン (Rotary Kiln) は、円筒形の炉が回転しながら加熱され、内部の材料を処理する装置であり、主にセメント製造や鉱物の焼成、廃棄物処理などで広く用いられている

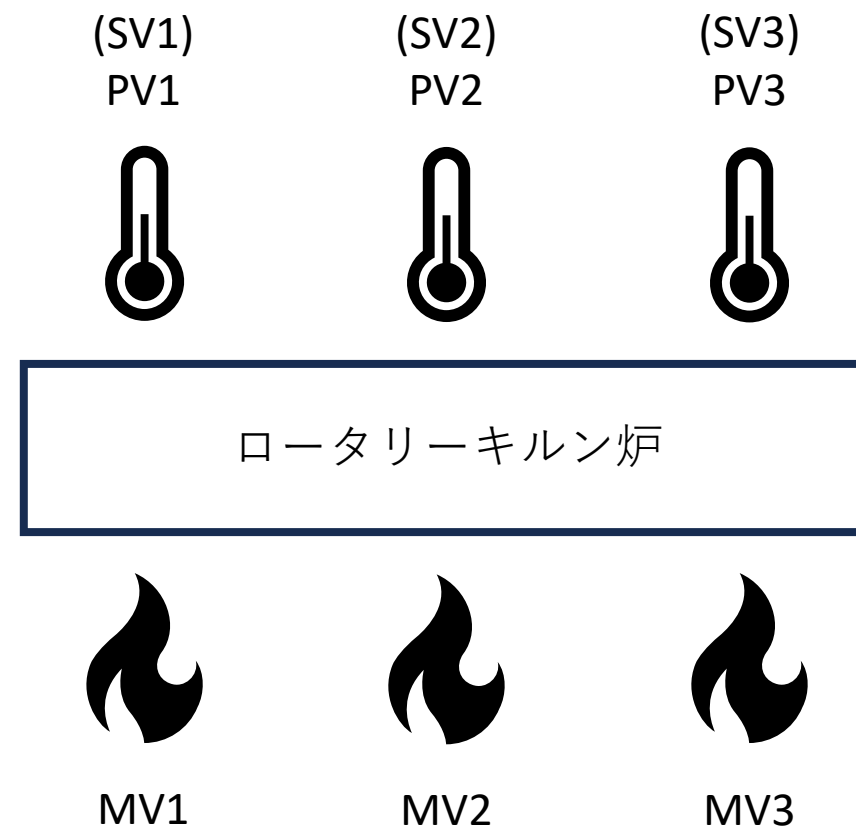
特徴と構造

- **円筒形の回転炉**で、わずかな傾斜が付いている
- ゆっくり回転することで、材料が攪拌され、均一な加熱が可能
- 高温の燃焼ガス (1000～1600℃程度) が炉内を通り、材料を焼成

対象のロータリーキルン（3入力3出力）

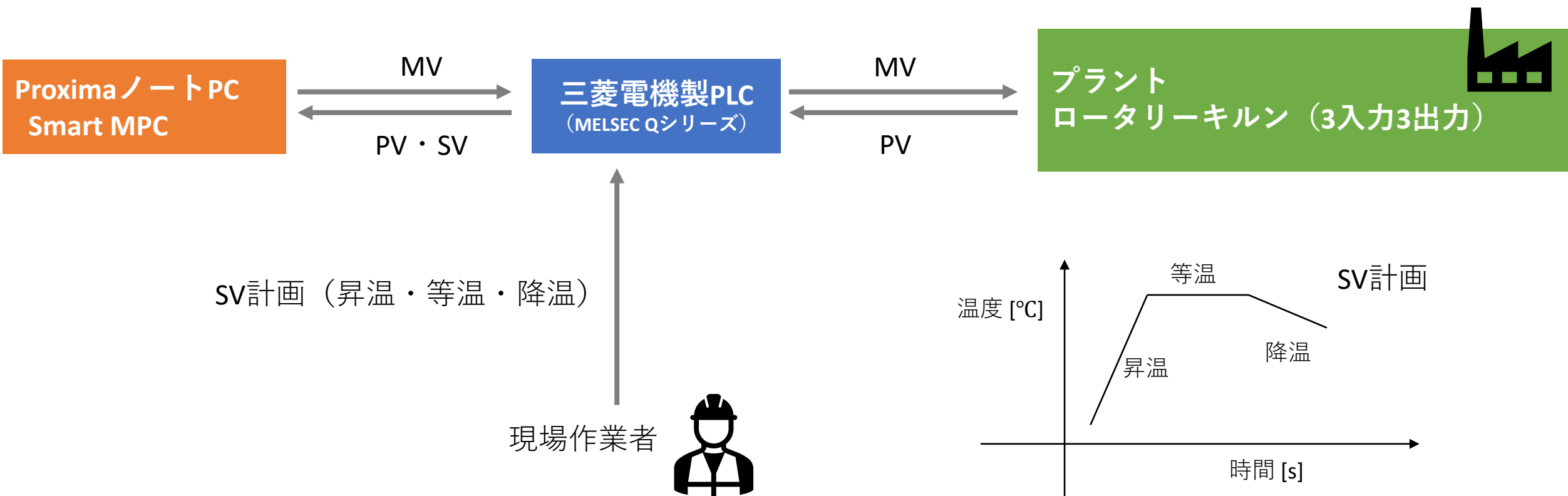
物理的な位置関係から **PV2** が温まりやすい（分布定数系）

→ 各**MV**と**PV**同士の関係を学習しないとうまく制御できない



制御目的とシステム構成

- PV: 炉内温度センサ値 [°C]
- MV: バーナー指令値 [%]、MVの値を大きくするほど炉内の温度が上昇する
- SV: PVを追従させる目標温度 [°C]、1つのPVに対して1つのSVが対応
 - 傾き一定で温度を上昇させ（昇温）、その後一定の温度を保ち（等温）、最後に傾き一定で温度を下げる（降温）ような時間変化する目標値（SV計画）
- 制御目的: 炉内温度PVと目標温度SVから最適なバーナー出力MVを決定し、PVをSVに追従させる



ランダム加振による初期学習データ収集



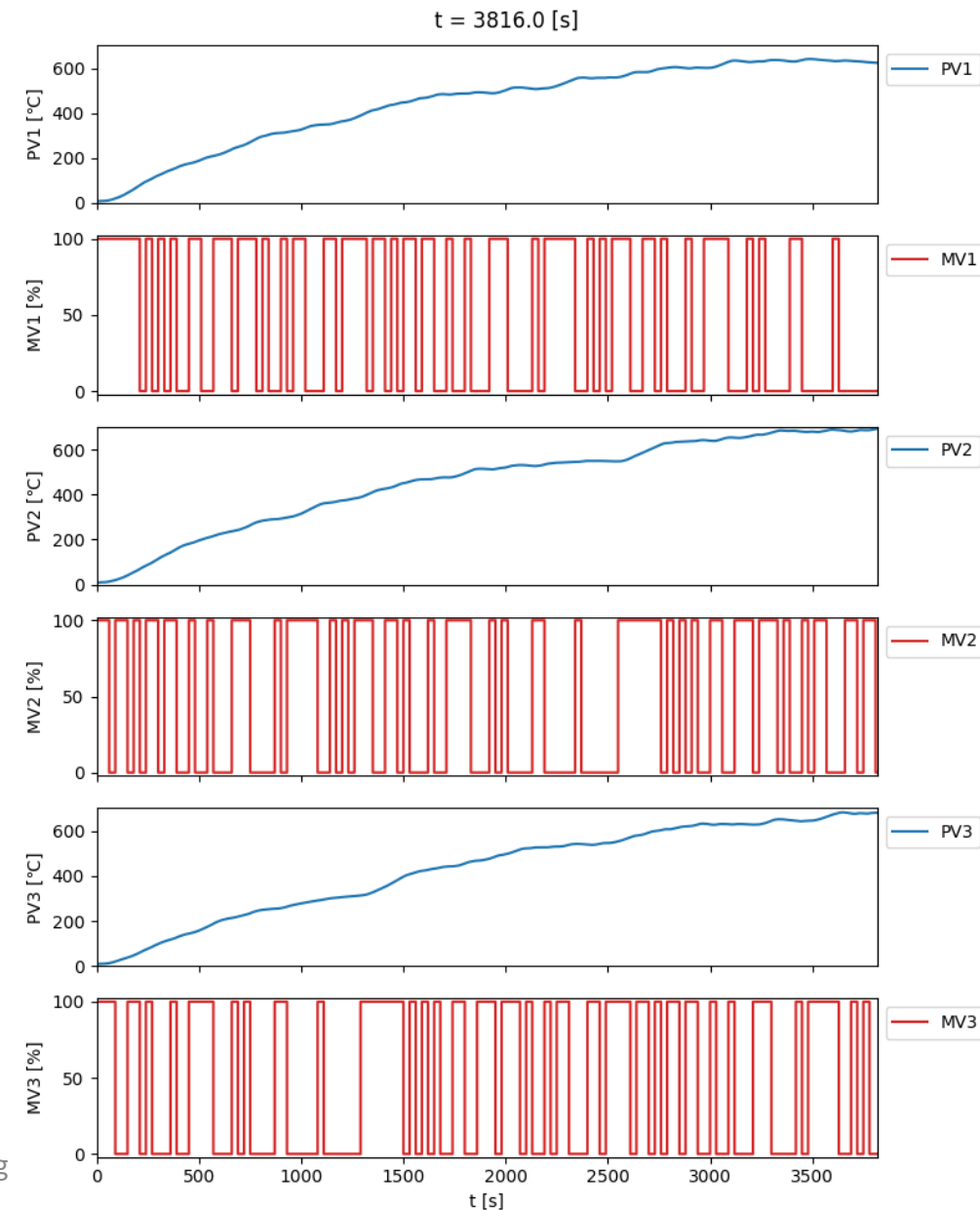
初期学習データの収集としてランダム加振を行った

ランダム加振のパラメータ

- 印加する2値MVの 0 %, 100 %
- (最小の) 切り替え間隔 30 秒
- データ収集にかける時間： **合計 60 分強**

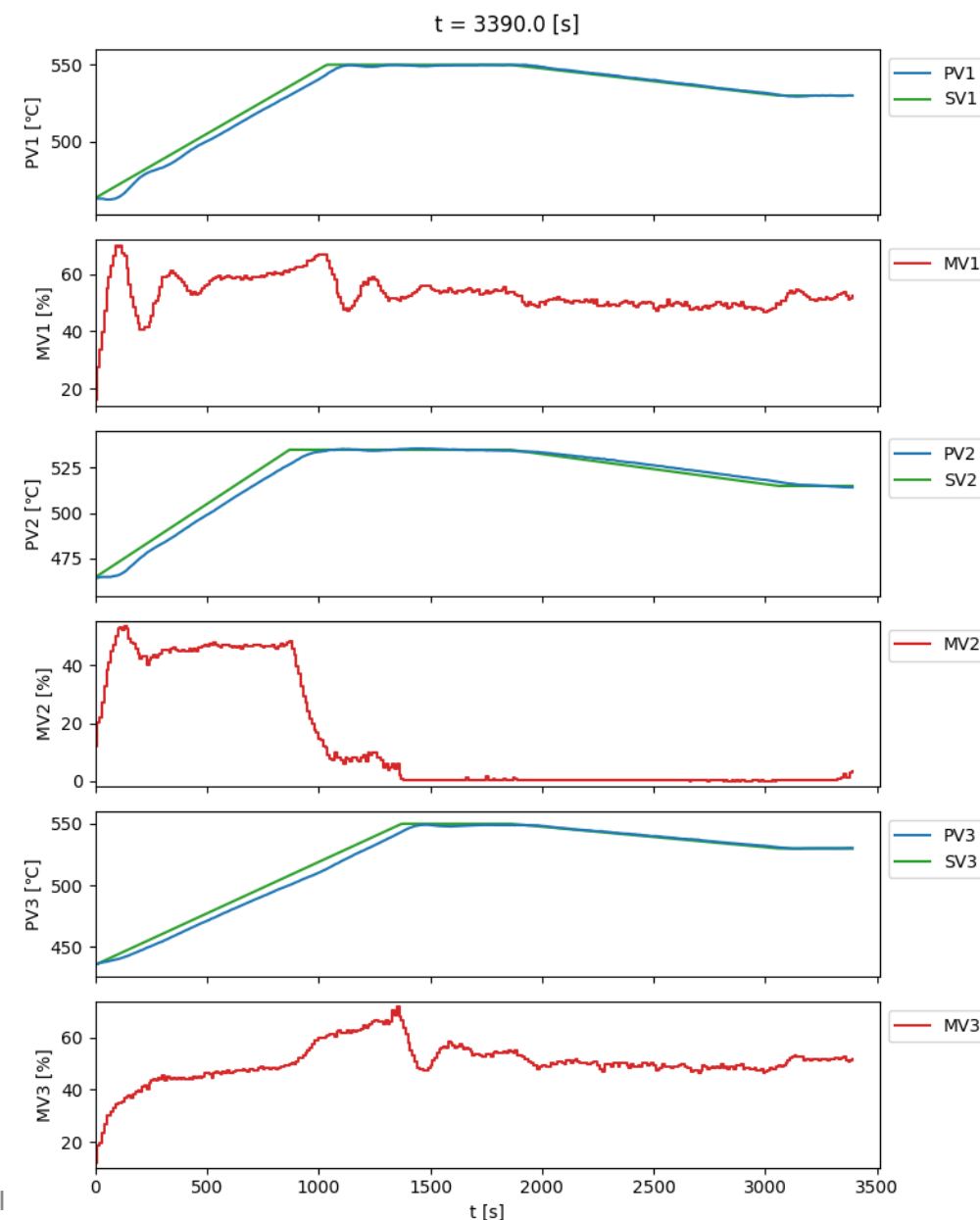
以上のパラメータは以下を考慮して、
お客様と相談して決めた

- プラントの負担とならない
- 炉内温度PVが実際の制御するときのSV付近となる
- **MV = 100 %** のとき温度PVが上昇し、**MV = 0 %** のとき温度PVが下降する様子がグラフで確認できる



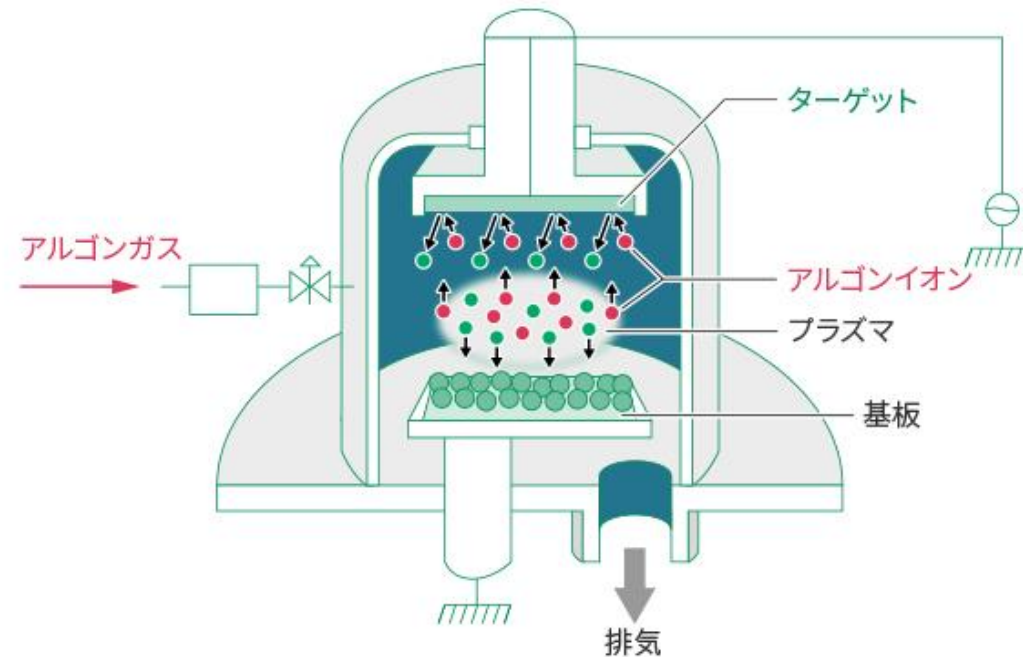
Smart MPCによる実際の運転

- オーバーシュート、ハンチングを小さく抑えつつSVに追従できている
- PID制御の場合はSV計画ごとにゲインを調整すれば同程度の性能になる
- この図以外にも異なるSV計画に対して試験運転を行ったが、Smart MPCは運転ごとにパラメータチューニングをせずとも一定の性能を出せる点が優れている
- **制御がうまくできていることから、各MVとPV同士の学習ができている**



製膜スパッタリングプロセスにおけるイオン注入量制御 (光学材料メーカー)

スパッタリングプロセスとは？



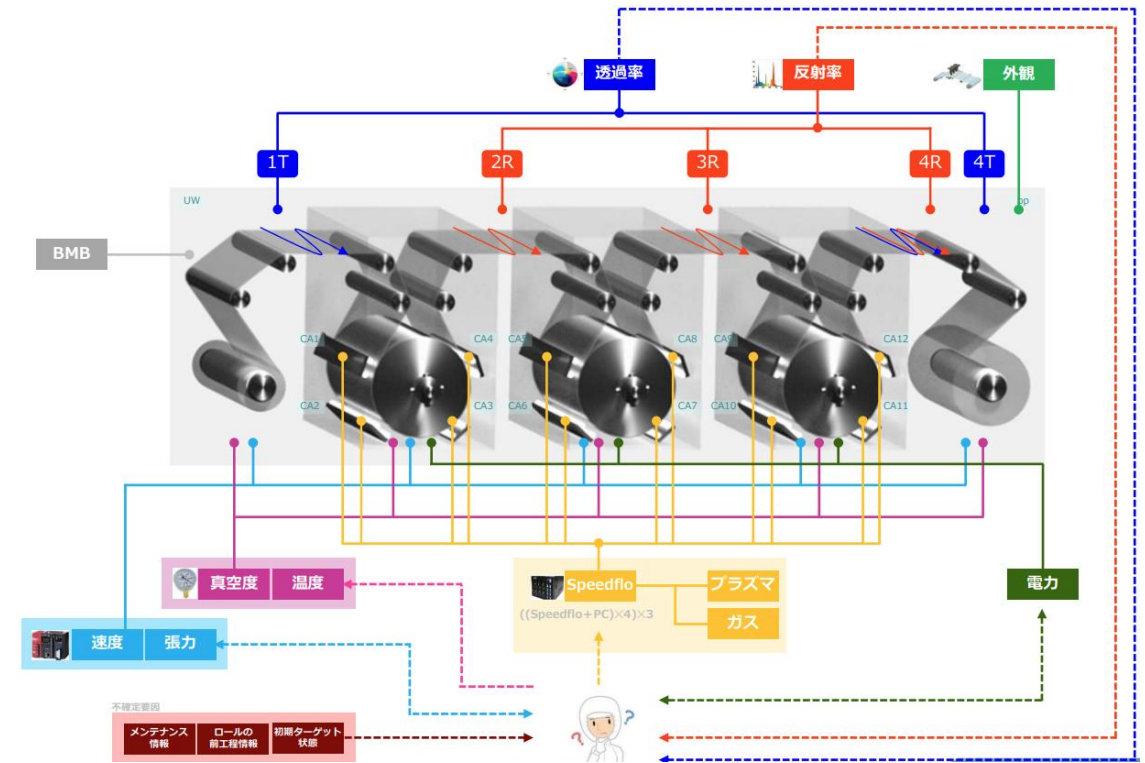
スパッタリングプロセス（**Sputtering Process**）とは、真空中でプラズマを利用してターゲット材（被膜にしたい材料）から原子や分子を放出させ、基板上に薄膜を形成する物理的蒸着法の一つ。ターゲットにイオンをぶつけ、その衝撃でターゲットの原子が叩き出されて基板上に薄膜として堆積する。

対象スパッタリングプロセス概要

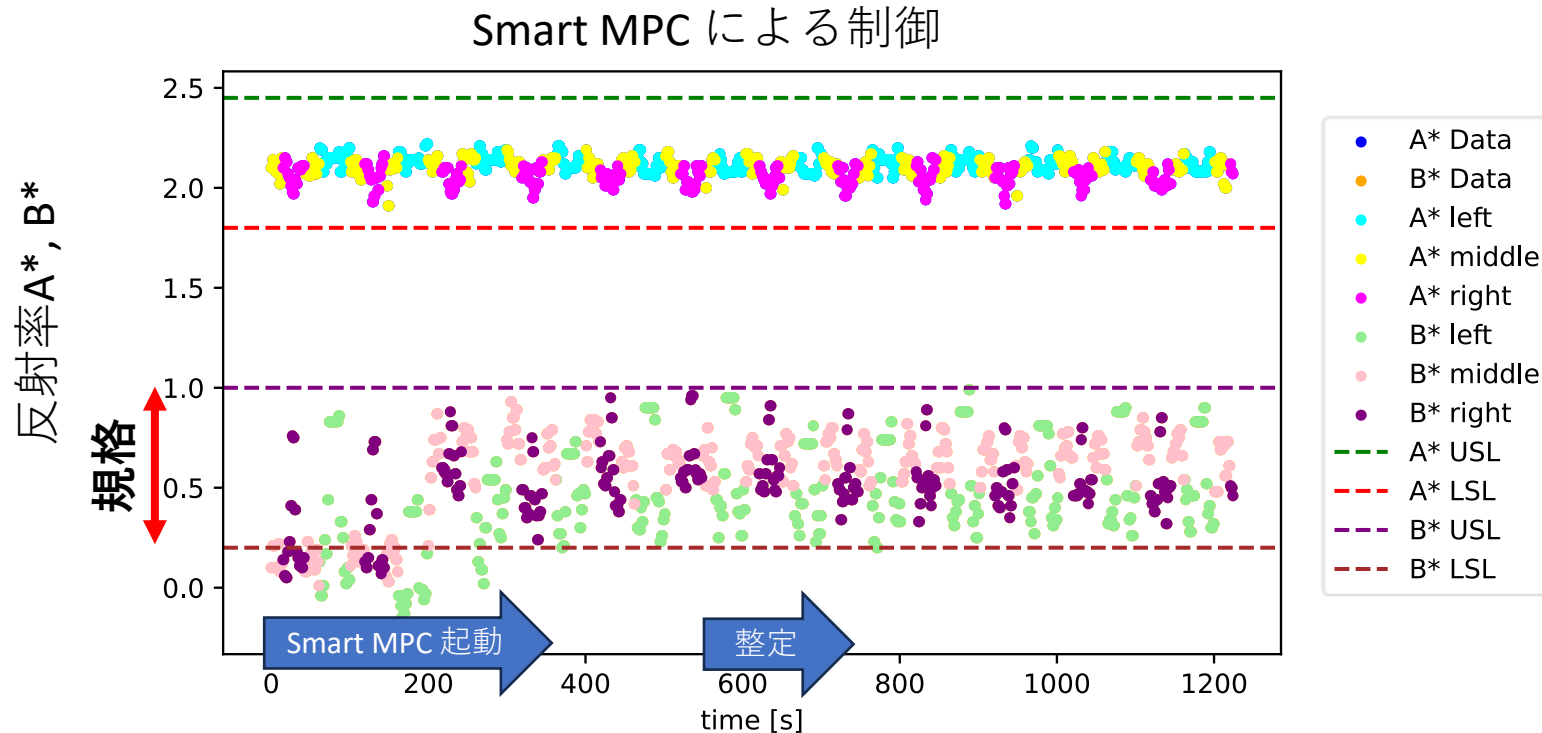
スパッタリング電圧を適切に制御することで、
多層構造の膜厚を調整し、反射防止効果を最適化できる。
各層の特性に合わせた電圧設定が、
高性能な光学フィルムの実現に不可欠。

スパッタリング電圧制御

- **SV設定（目標反射率）**
 - 反射率を規格内に収める
- **PVの測定（実測反射率）**
 - 成膜中の反射率をリアルタイム測定
- **MVの調整（フィードバック制御）**
 - PVとSVから、最適化計算によりスパッタリング電圧（MV）を決定
 - 反射率が高すぎる場合 → 電圧を調整して膜厚を増減し、屈折率・干渉効果を最適化。



Smart MPC によるスパッタリング制御



- 目標通り、整定後には**反射率がすべて規格内に収まっている**。
- left, middle, right はフィルムの幅方向の位置
- 反射率の性能としては、オペレータと同程度**
- Smart MPC の導入によりオペレータの**人件費削減**を目指す
(現状のオペレータの制御では、1日約**16時間**、人が張り付きで操作している)