

2024年度 JPECフォーラム

ファウリング予測モデル技術開発

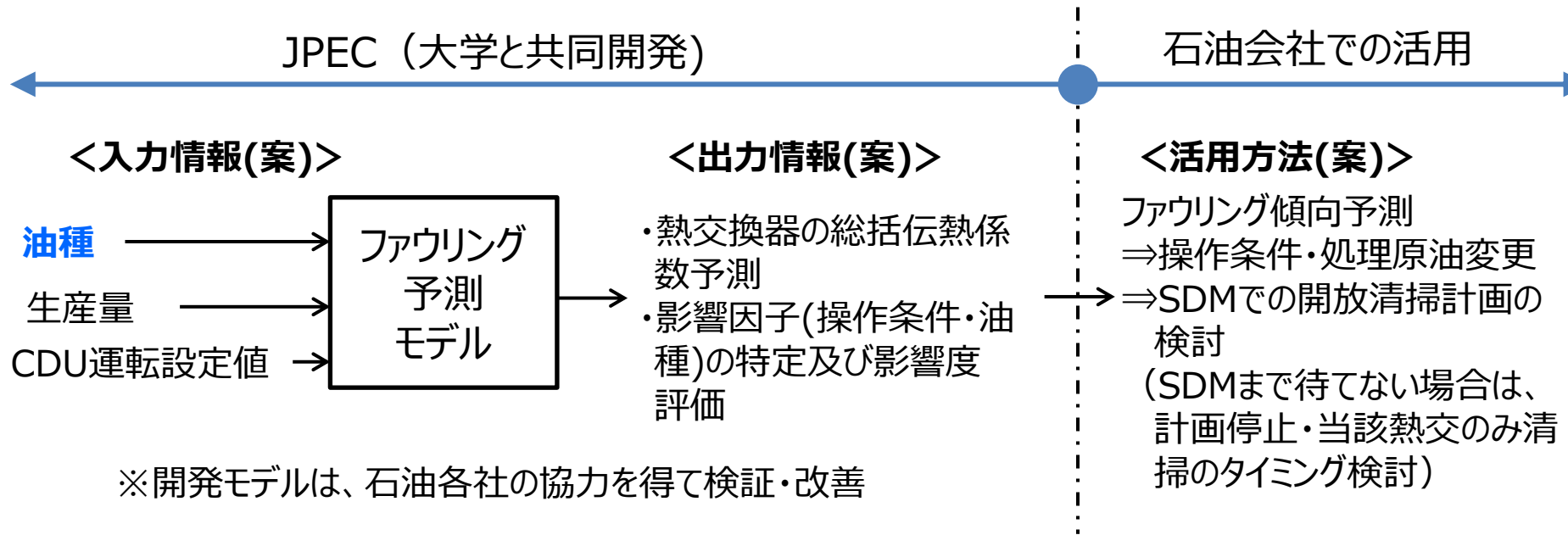
2024年5月14日

JPEC ペトロリオミクス技術研究室

1. ファウリング予測モデルの開発目標
2. ファウリング予測モデル開発手順
3. ファウリング影響因子の解析
4. 因子操作によるファウリング抑制の検討
5. まとめ

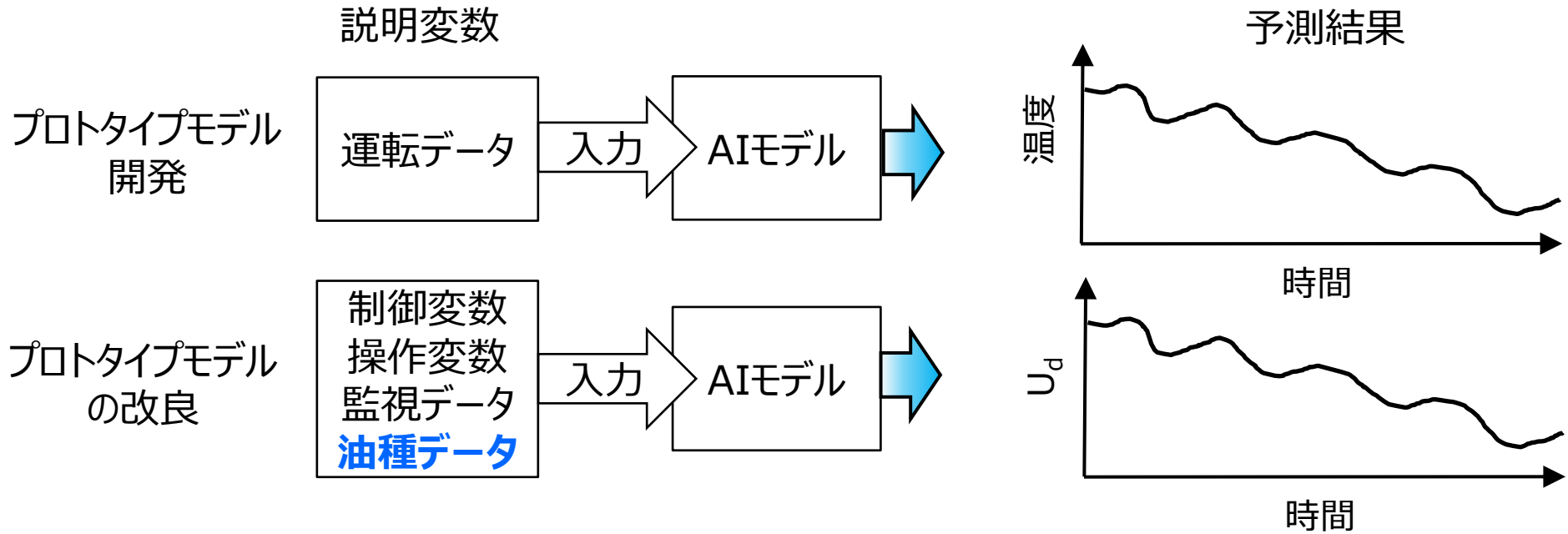
1. ファウリング予測モデルの開発目標

- CDU熱交換器におけるファウリング・・・長期連続運転における省エネの阻害要因
⇒熱交換器のファウリング抑制のため、AIを用いて入力情報（特に油種情報）からファウリングの指標となる総括伝熱係数(U_d)を予測できるモデルを構築する。



- 開発したファウリング予測モデルを用い、 U_d に影響する因子及びその影響度を解析し、ファウリング抑制策の検討に活用する。
(各社熱交換器に合わせたモデルのチューニングは、開発した大学もしくは大学より技術を継承した会社にて実施することを想定)

2. ファウリング予測モデル開発手順

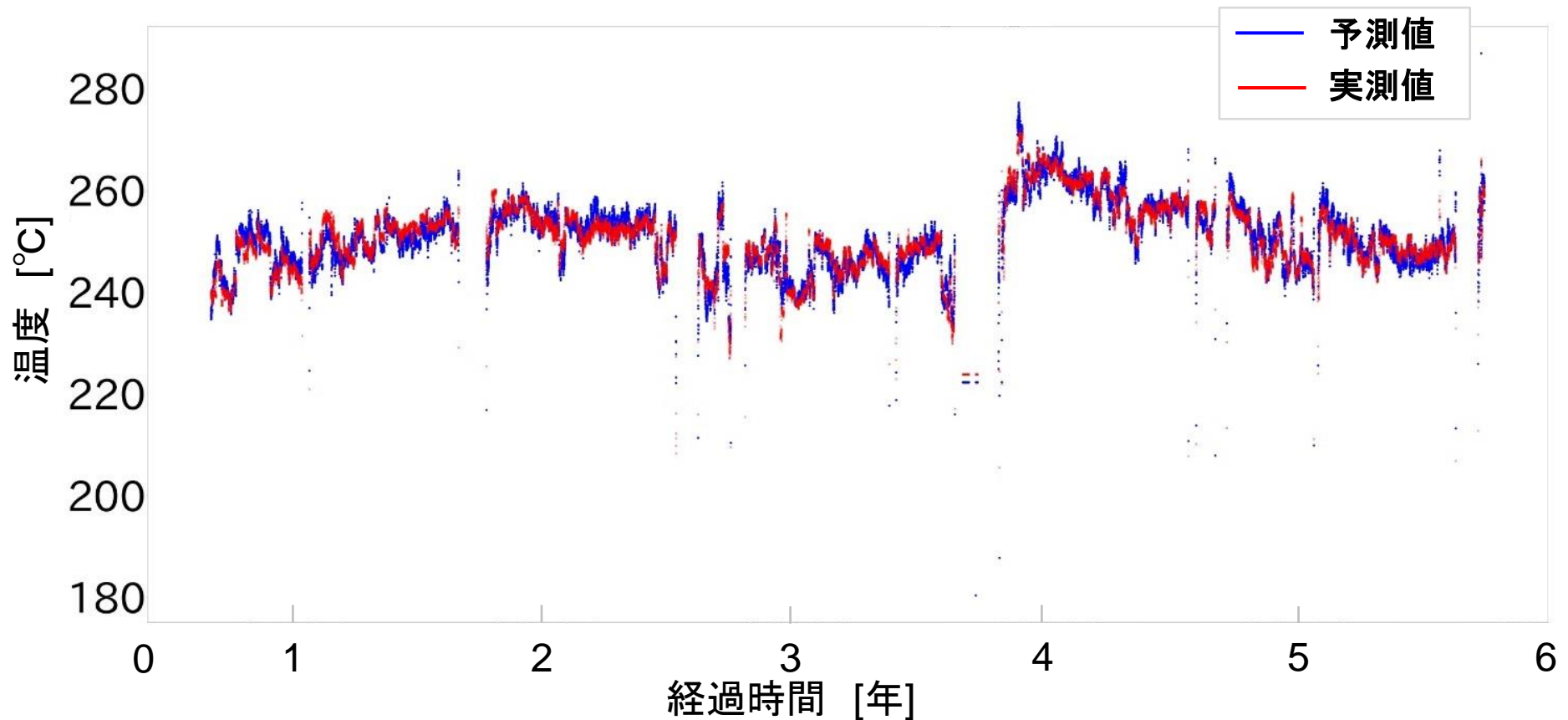


- ①トッパー運転データ（248個）のみを用い、温度を予測するプロトタイプモデルを開発
- ②プロトタイプモデルをベースに、運転データを制御変数・操作変数・監視データに区分し、油種別の処理量データも加え、4種類の入力変数の組み合わせに対して各々U_d予測モデルを作成、伝熱効率への影響度を評価

＜運転データの区分とデータ数＞

制御変数（目標値となるよう調整する変数）	56
操作変数（制御変数を調整するため操作する変数）	48
監視データ（操作を行わず、状態を監視するデータ）	144

① プロトタイプモデルによる温度予測の例（熱交換器出口温度）



- PLS（部分的最小二乗法）を用いて予測モデルのプロトタイプを作成。
- プロトタイプモデルによる予測値と実測値は良好に一致し、本方法により精度の高い予測ができることが判った。

②各変数のファウリングに与える影響度評価

- プロトタイプと同様の手法を用いて説明変数の異なる各モデルを作成し、油種のファウリングに与える影響について検討した。
- 油種別処理量データの追加による予測精度向上効果は僅少であり、油種のファウリング影響は見られなかった。

【理由】CDUでは複数原油が混合処理されているが、本検討に協力頂いた製油所では、CDU安定運転のために処理原油の性状をコントロールしており、原油種や処理量により伝熱効率が顕著に悪化するような教師データが無かったと推測

番号	操作変数	制御変数	監視データ	油種別処理量	平均絶対誤差【℃】
1(プロトタイプ)	○	○	○		0.433
2	○	○	○	○	0.430
3	○	○			1.080
4	○	○		○	0.987
5	○		○		0.475
6				○	0.461
7		○	○		0.568
8				○	0.558
9	○				2.120
10				○	1.890
11		○			2.630
12				○	1.940
13			○		0.668
14				○	0.648

- 最も誤差の少ない2番ケースのモデルを用い、 U_d に影響する因子の抽出法及び影響因子を変更した時のCO₂削減効果を試算する手法の検討とその試算を実施

3. ファウリング影響因子の解析

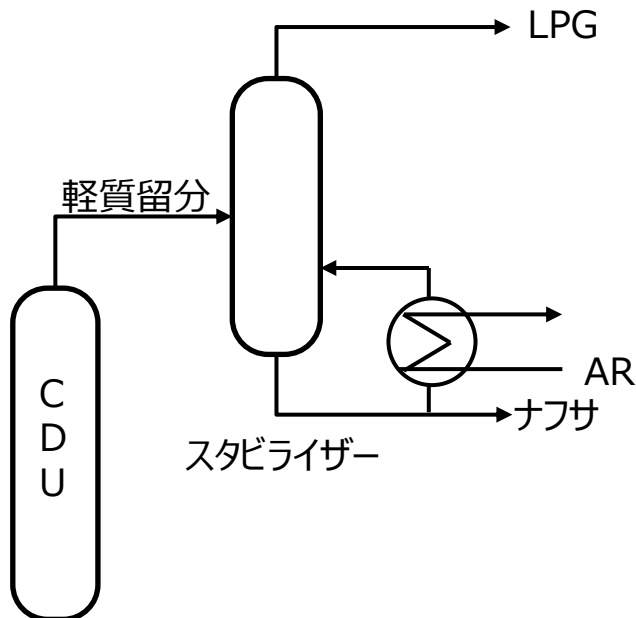
① 影響度の高い因子の抽出

- 運転操作によるファウリング抑制効果を検討するため、ファウリング予測モデルを用いて U_d に対し影響度の高い因子を抽出。
- 抽出した影響因子の中から、操作によりファウリングを抑制できる因子として以下の条件を満たすものを選定。

【影響因子選定条件】

- (1)現場で操作・変更できる因子（操作変数・制御変数・油種）であること
- (2)独立して操作できる因子であること（操作により他の因子が連動して変化した場合、 U_d に与える影響の予測が困難であるため）

⇒スタビライザーリボイラー燃料流量とスタビライザー張込量を選定



スタビライザー：CDU塔頂部から抜き出した軽質留分（LPG、ナフサ等）を張込み、LPGとナフサに分留する装置

スタビライザーリボイラー燃料流量

：スタビライザーのリボイラーの熱源として利用される常圧残油（AR）の流量

スタビライザー張込量

：スタビライザーに張り込む軽質留分の流量

②影響因子選定

因子の影響度（1単位当たりの効果の大きい順）

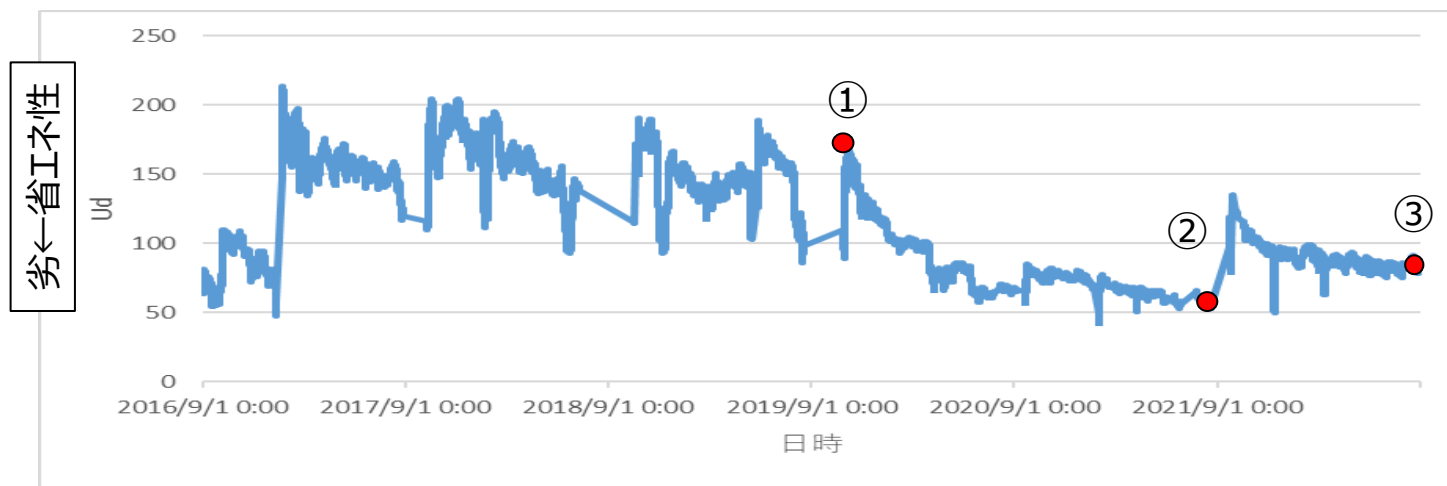
種類	因子	影響度	単位	備考
監視データ	脱硝設備触媒操作圧	-7.047	°C/(KPa)	
監視データ	アンモニア注水ポンプ吐出圧力	6.798	°C/(Mpa)	
監視データ	HGO得率	-0.975	°C/%	
制御変数	ストリッパースチーム流量	0.548	°C/(Ton/Hr)	他変数と相関が高い
監視データ	LGO得率	-0.533	°C/%	
監視データ	プレフラッシュドラム出口温度	0.512	°C/°C	
監視データ	常圧残油得率	0.476	°C/%	
監視データ	熱交換器シェル側入口温度	0.439	°C/°C	
監視データ	熱交換器シェル側出口温度	-0.305	°C/°C	
監視データ	KEROSENE得率	-0.286	°C/%	
監視データ	トッパーレイ温度	0.276	°C/°C	
操作変数	水素流量	0.149	°C/(KL/Hr)	他変数と相関が高い
操作変数	スタビライザーリボイラー燃料流量	-0.123	°C/(KL/Hr)	
監視データ	HGOリフックス温度	-0.055	°C/°C	
監視データ	H1温度	0.054	°C/°C	
操作変数	スタビライザー張込量	-0.047	°C/(KL/Hr)	
制御変数	LGOリフックス流量	0.037	°C/(KL/Hr)	他変数と相関が高い
監視データ	トッパーレイ温度	-0.034	°C/°C	

※影響度の数値が正のものは因子の値が大きくなるほど伝熱効率が悪化し、負のものは伝熱効率が良くなることを示す。

③影響因子の解析結果

- 時間の経過と共に U_d の値が変化
⇒ファウリングが進行し U_d が低下した場合でも操作による改善効果が期待できるか、複数の時点で確認

データ日時	影響因子	感度	備考
①2019/11/21 0:00	スタビライザーリボイラー燃料流量	-0.63	定期清掃終了後
	スタビライザー張込量	-0.24	
②2021/8/10 0:00	スタビライザーリボイラー燃料流量	-0.47	定期清掃直前
	スタビライザー張込量	-0.18	
③2022/8/31 23:00	スタビライザーリボイラー燃料流量	-0.47	最新データ
	スタビライザー張込量	-0.18	



- ファウリングが進行した場合でも U_d に対する感度の変化は25%程度
⇒ファウリングが進行しても改善は期待できると考察

4. 因子操作によるファウリング抑制の検討

① U_d 変化予測の考え方

➤ ファウリング予測モデルは瞬時値についてある因子を操作した場合の影響度を予測するものであり、時間要素は無い。そのため、以下の仮定をおいて将来の U_d 変化を予測した。

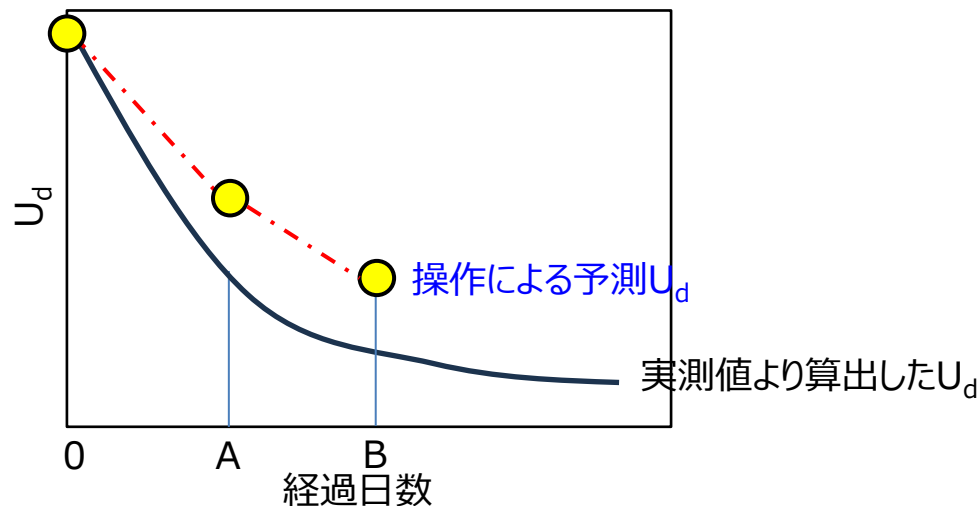
- 操作する因子（ここでは x_1 とする）は、一定の値（ここではその値を k とする）に保つことができるものとする。
- x_1 を操作しても、他の因子の現在値およびその後の変化に影響は無いものとする。（ x_1 以外の因子は、モデル構築に用いたデータと同じ経時変化をすると仮定する）

起点 : $U_d = f(x_{10}, x_{20}, x_{30}, x_{40}, \dots)$

A日経過後 : $U_{dA} = f(k, x_{2A}, x_{3A}, x_{4A}, \dots)$

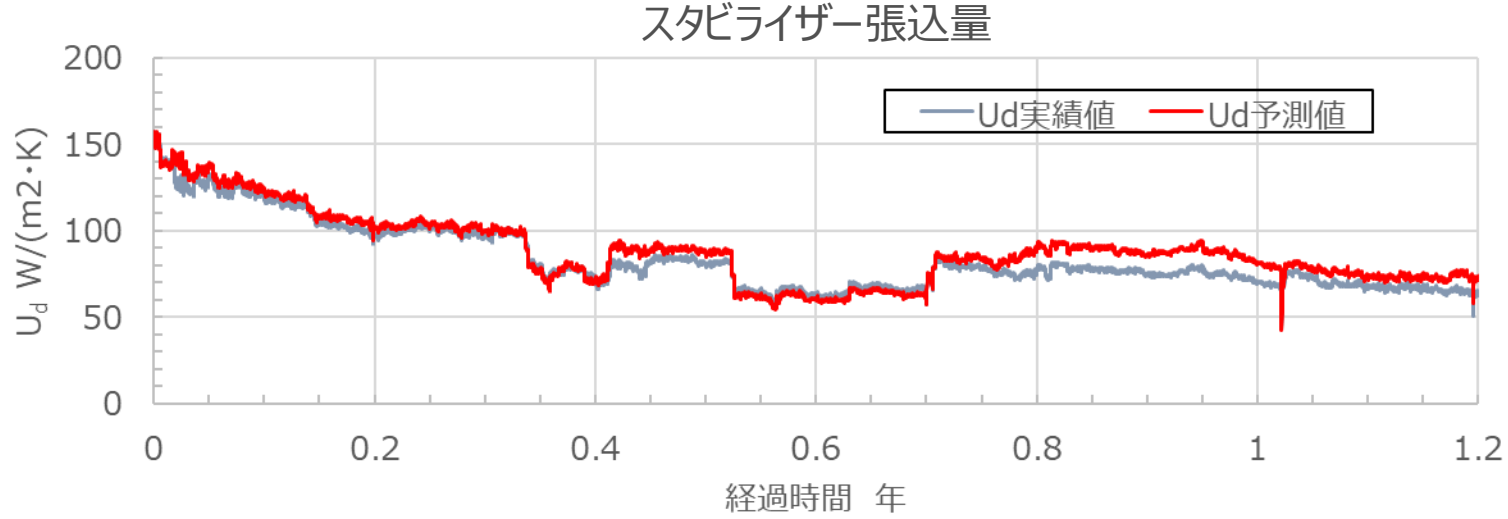
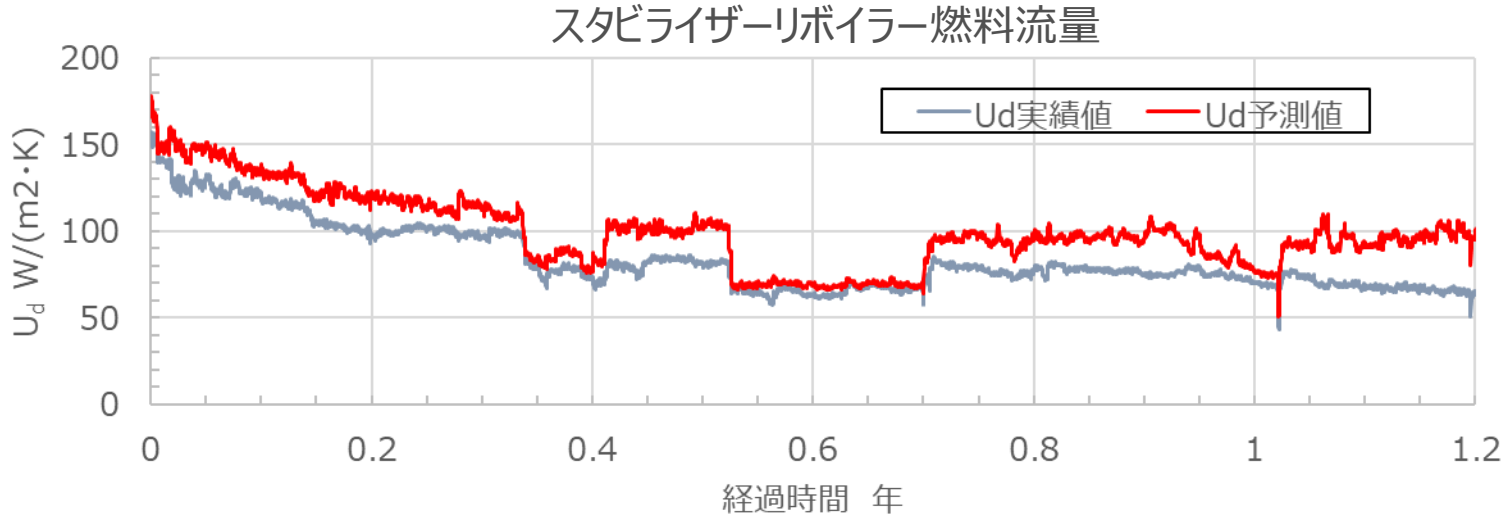
B日経過後 : $U_{dB} = f(k, x_{2B}, x_{3B}, x_{4B}, \dots)$

⋮
⋮



② U_d 変化予測結果

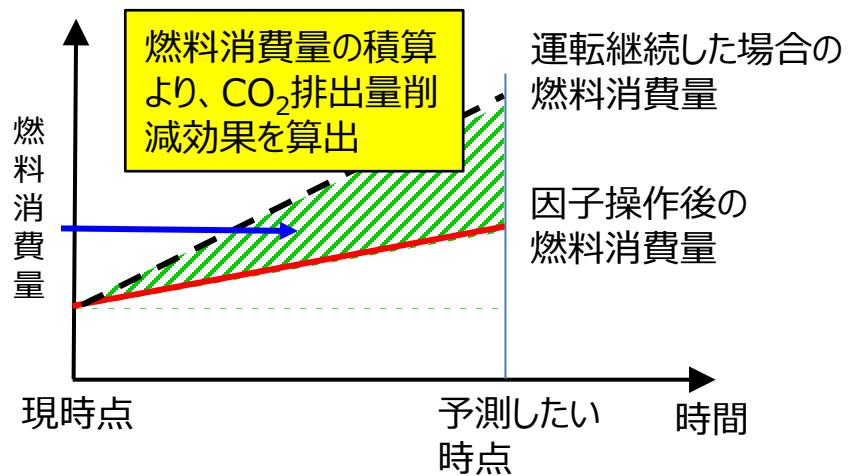
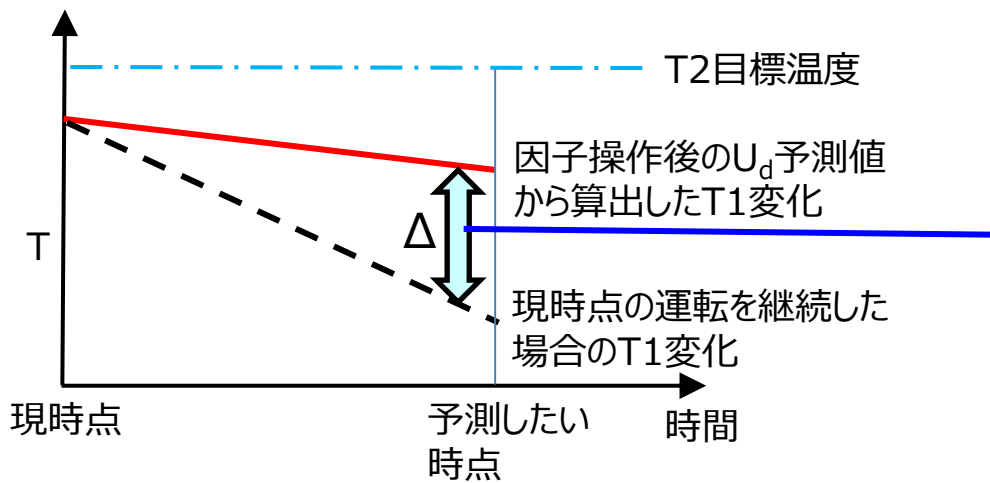
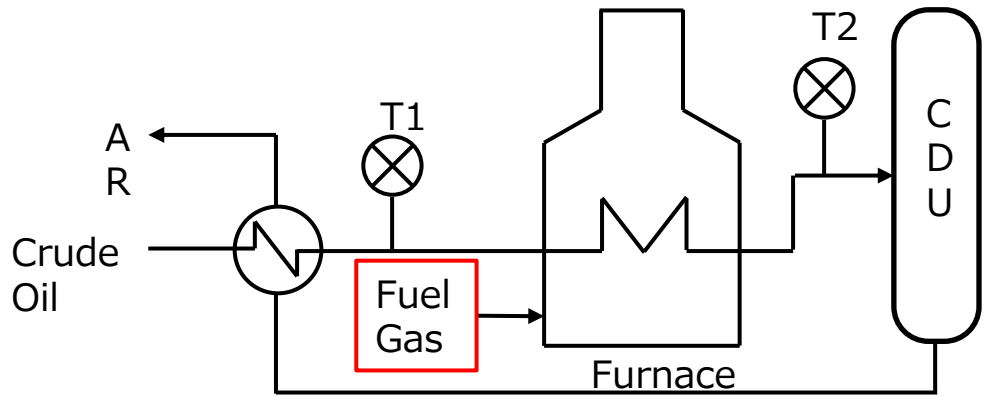
➤ 製油所定期清掃の間(9ページ①～②)について、影響因子を操作した場合の U_d 変化を予測。



➤ スタビライザーリボイラー燃料流量の方がスタビライザー張込量よりも U_d への影響度が大きく、ファウリング抑制効果が高かった。

③ CO₂排出量削減効果の推算

➤ ファウリングによるU_d低下に伴い熱交換器出口温度(T1)が低下するため、CDU入口温度(T2)を目標温度となるようFurnaceにより加温する必要がある。影響因子の操作によりU_d低下速度(≒T1低下速度)が小さくなれば、Fuel Gasの使用量を減らすことができる。



⇒目標温度とするために必要な燃料消費量を実測U_dと予測U_d各々から算出してCO₂換算し、以下の排出量削減効果があるとの結果を得た。(CDU排出量全体の約1.5%)

- ・スタビライザーリボイラー燃料流量操作時 : 約2.5千ton/年
- ・スタビライザー張込量操作時 : 約0.8千ton/年

④ 解析結果から得られた知見

- 運転データ解析より、灯軽油留分の得率が下がり、AR留分の得率が上がるとファウリング抑制に繋がるとの結果が得られた。

⇒ 熱交換器の開放・清掃時期を延ばすためにFeed量を減らすより留分得率を変更した方が有利であれば、蒸留条件の変更が選択肢となり得る。

タグ名	単位	U _d に対する影響度		石油会社コメント
脱硝設備の触媒層差圧	KPa	-7.047	°C / KPa	経時的に増加していく因子であり、影響度は高いがU _d と相関しているとは言い難い
アンモニア注水ポンプ吐出圧力	MPa	6.798	°C / MPa	現状廃止
HGO得率	%	-0.975	°C / %	
LGO得率	%	-0.533	°C / %	
プレフラッシュドラム出口温度	°C	0.512	°C / °C	熱交換器直前の温度であり、チューブ側入口温度とほぼ同じ
常圧残渣油得率	%	0.476	°C / %	
熱交換器シェル側入口温度	°C	0.439	°C / °C	U値計算の一要素
熱交換器シェル側出口温度	°C	-0.305	°C / °C	U値計算の一要素
KEROSENE得率	%	-0.286	°C / %	
トッパー#27トレイ温度	°C	0.276	°C / °C	軽油拔出段のトレイ温度

【推定原因】軽質留分がAR中に多く含まれることによりAR中の析出成分が溶解しやすくなり、熱交換器シェル側（AR側）の汚れが低減されると考察。

【石油会社見解】軽質留分の得率がファウリングに影響するという知見は無いが、AR留分の得率が増えた場合にファウリングが少なくなることは経験上あり得る。

5. まとめ

本研究開発において、以下の成果を得た。

- CDU原油予熱系熱交換器の運転データを用い、AIにより熱交換器 U_d を高精度で予測するモデルを作成できた。
- 本モデルにより、 U_d への影響度が高い運転操作因子を抽出できた。
- 抽出因子の操作によるファウリング変化の予測及び、その際の CO_2 排出量変化を試算する手法を開発できた。
- ファウリング予測モデルを用いた解析により、 CO_2 排出量削減につながりうる新たな知見を得ることができた。

謝辞

本研究は経済産業省・資源エネルギー庁の
補助事業として実施されました。
ここに記して、謝意を表します。