

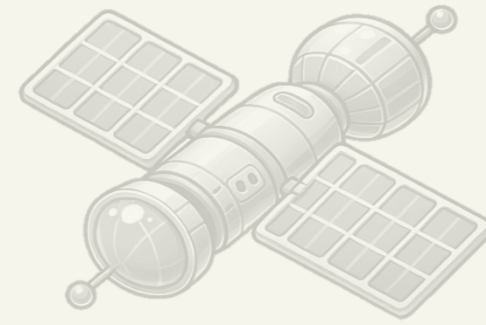
以Landsat-8衛星海表面溫度觀測台灣 北部發電廠溫排水變化

歐陽頡、黃世任
國立臺灣海洋大學
2025.09.04



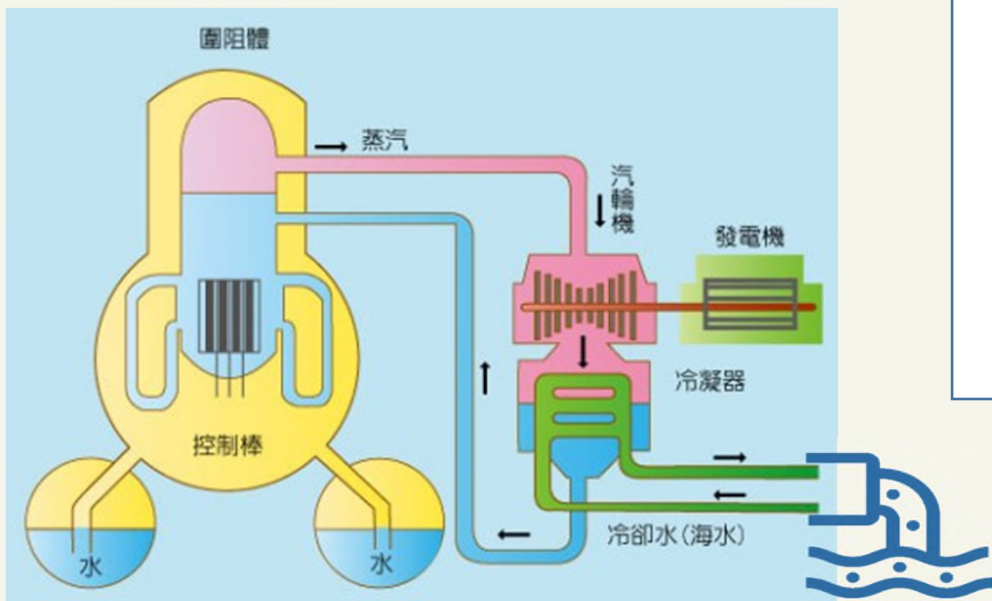
大綱

- 前言
- 研究區域與資料
- 研究方法
- 結果與討論
- 結論



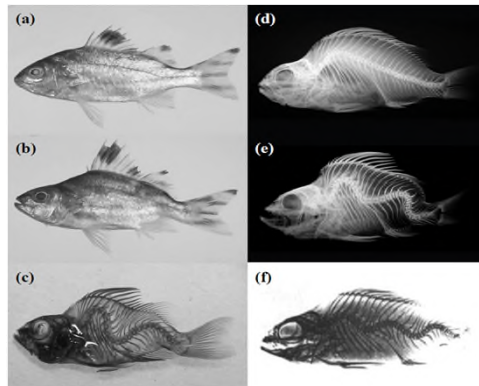
前言

介紹&影響



Sources:
<https://www.taipower.com.tw/1136/1146/1153/3054/normalPost>

- 形成熱分層(Huang et al., 2019)
- 衝擊生態 e.g. 秘鯛魚(Chang et al., 2010)



=>制定溫排水的排放標準(Madden et al., 2013)

升溫約7~10°C
(Manjunatha et al., 2015)

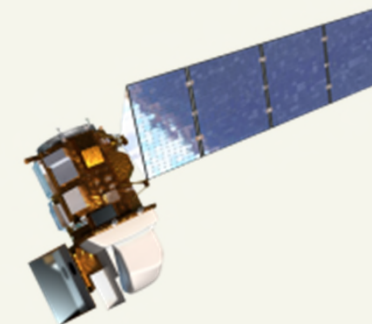
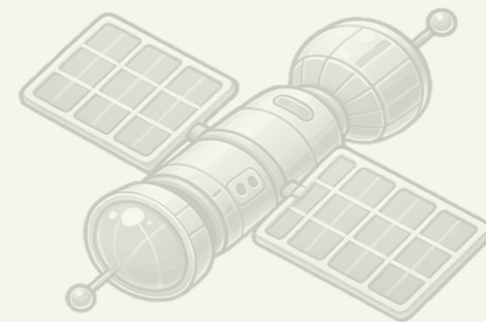


現場測量

浮標、船測、測站、溫度計、...
更為準確且較不受天候影響

遙測

衛星、無人機、...
大面積、長時間觀測

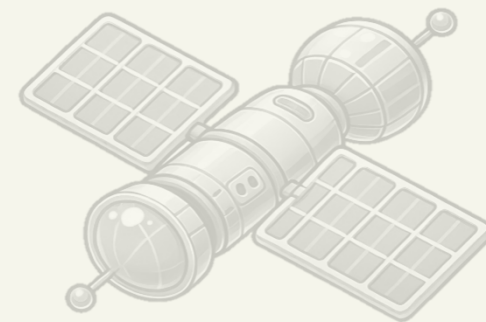


前言

動機&目的

- 環境部水污染防治法的放流水標準：
 - 發電廠放流口水溫不得超過42°C
 - 距排放口500公尺處的表面水溫差不得超過4°C

名稱	發電機組	裝置容量 (MW)	除役日期	狀態
核一廠	一號機	636	2018/12/05	已除役
	二號機	636	2019/07/15	已除役
核二廠	一號機	985	2021/12/27	已除役
	二號機	985	2023/03/14	已除役
協和發電廠	協一機	500	2019/12/31	已除役
	協二機	500	2019/12/31	已除役
	協三機	500	-	商轉中
	協四機	500	-	商轉中



- 溫排水監測：
 - 每季定期檢測
 - 連續水質監測系統



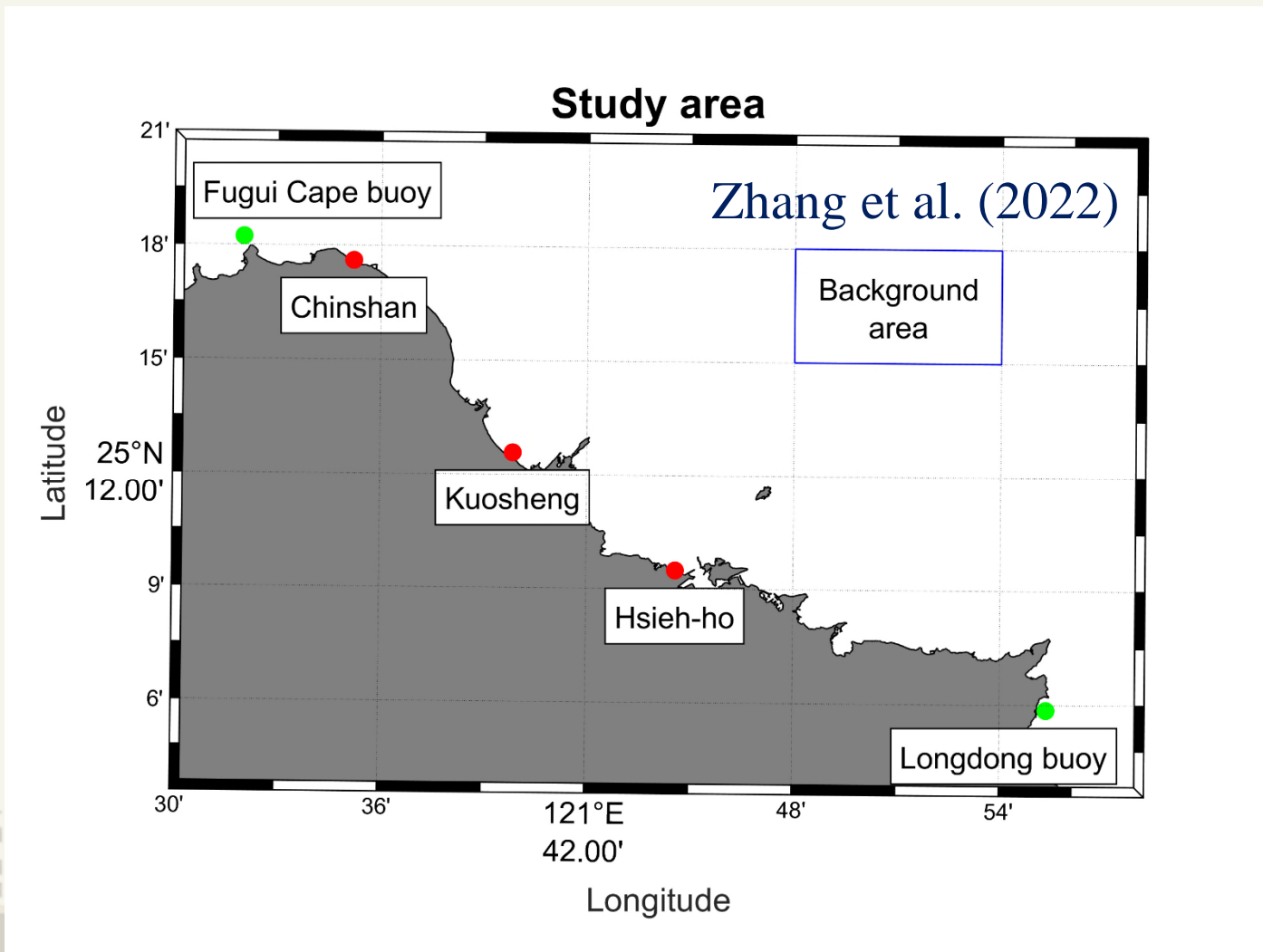
溫排水空間分布



- 使用Landsat-8衛星資料推算海表面溫度，計算溫排水的升溫面積與最遠距離，探討漲退潮、風向與發電量對於溫排水的影響

研究區域與資料

研究區域



研究區域與資料



實測資料

項目	單位	來源	位置	採樣間隔
發電廠水溫	°C	環境部	核一廠、核二廠、協和發電廠	1小時一筆
發電廠水量	m ³	環境部	核一廠、核二廠、協和發電廠	1小時一筆
浮標海溫	°C	中央氣象署	富貴角浮標、龍洞浮標	1小時一筆
潮位	mm	中央氣象署	基隆潮位站	6分鐘一筆
風速風向	m/s	中央氣象署	金山氣象站、基隆氣象站	1小時一筆
發電量	KWH	台灣電力公司	核一廠、核二廠、協和發電廠	每日一筆

衛星資料

項目	來源	採樣間隔	資料內容
Landsat-8	USGS	16天一筆	可見光(Band 1~Band 4)、近紅外(Band 5, Band 9)、短波紅外(Band 6, Band 7)、全光譜(Band 8)與熱紅外(Band 10, Band 11)
Himawari-8	JAXA	10分鐘一筆	Himawari-8 Level 2 海表面溫度，解析度2公里

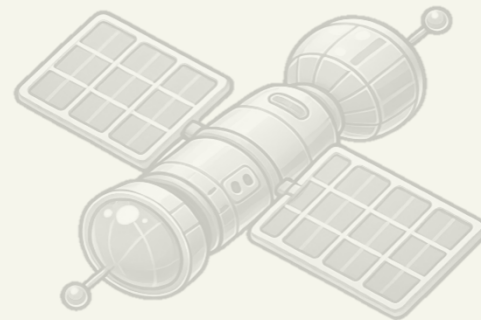
Operational Land Imager sensor (OLI)

	Band	Wavelength (μm)	Resolution (m)
1	Coastal/Aerosol	0.435-0.451	30
2	Blue	0.452-0.512	30
3	Green	0.533-0.590	30
4	Red	0.636-0.673	30
5	NIR	0.851-0.879	30
6	SWIR-1	1.566-1.651	30
7	SWIR-2	2.107-2.294	30
8	Panchromatic	0.503-0.676	15
9	Cirrus	1.364-1.384	30

Thermal Infrared Sensor (TIRS)

	Band	Wavelength (μm)	Resolution (m)
10	TIR-1	10.60-11.19	100 (resampled to 30 m)
11	TIR-2	11.50-12.51	100 (resampled to 30 m)

研究區域與資料



時間選擇

■ 範圍：2015年至2022年間

- 每月5、15、25日的發電廠發電量與水量資料進行時間序列分析
- Landsat-8衛星影像共181幅，選用其中147幅包含使用地面控制點修正高差位移，提高幾何校正準確度，扣除研究區域受雲覆蓋的影像後剩餘83幅
- 根據影像日期選取發電廠水溫、浮標海溫、潮位、風速風向與發電量



研究方法

雲遮處理

■ Landsat-8像素品質資料(QA pixel)
(USGS, 2020)



Clear

Snow/Ice

Cirrus+Cloud shadow

Cloud shadow

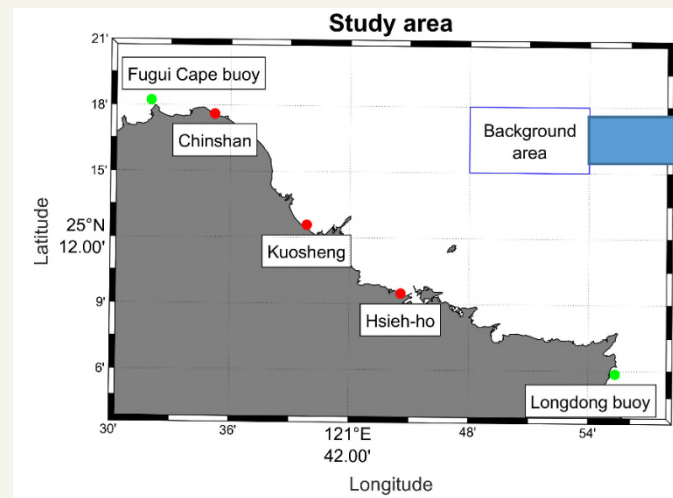
Cirrus

Cirrus+Snow/Ice

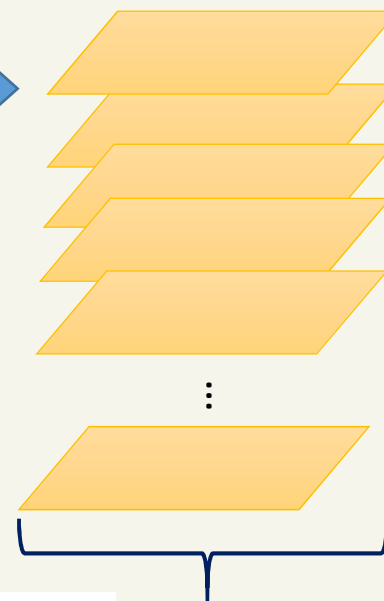
Dilated

Cloud

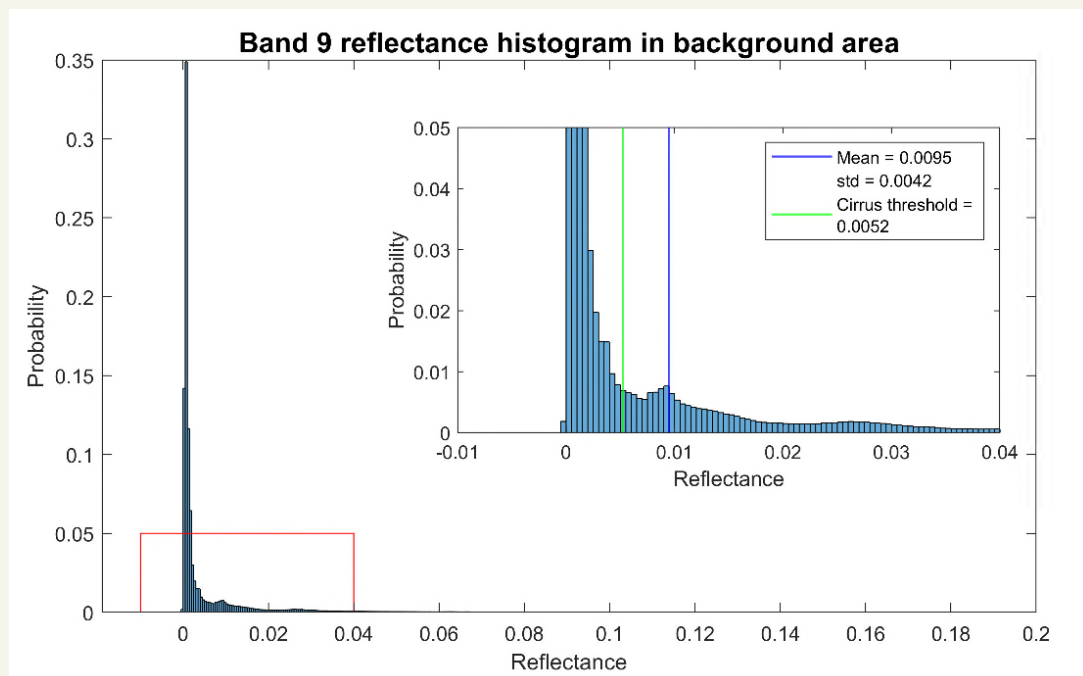
■ 卷雲反射率參考閾值(曾忠一, 1988)



Band 9 reflectance



83幅



研究方法

演算法建立

■ 分裂視窗法理論(McClain, 1985; 曾忠一, 1988)

➤ 簡化的輻射傳遞方程式：

$$L_{\lambda} = B_{\lambda}(T_S)\tau_{\lambda} + B_{\lambda}(\bar{T}_{\lambda})(1 - \tau_{\lambda})$$

$\tau_{\lambda} = \exp(-k_{\lambda}X) \approx 1 - k_{\lambda}X$
(假設大氣層平均溫度相同(McMillin, 1975))

$$L_{\lambda} = B_{\lambda}(T_S) + k_{\lambda}X[B_{\lambda}(\bar{T}_{\lambda}) - B_{\lambda}(T_S)]$$

泰勒展開寫成溫度形式 &
代入兩個熱紅外波段

$$T_S = T_{11} + \frac{k_{11}}{k_{12} - k_{11}}(T_{11} - T_{12})$$

10.5~12.5 μm ：水汽為吸收體，
亮度溫度、大氣層平均溫度與表
面溫度相近

代號	意義
L_{λ}	大氣層頂輻射強度
$B_{\lambda}(T_S)$	表面溫度 T_S 時黑體放出的 輻射強度
τ_{λ}	大氣透射率
\bar{T}_{λ}	不同熱紅外波段下大氣層 的平均溫度
k_{λ}	吸收係數
X	水氣含量
T_{11}, T_{12}	波段11 μm 與12 μm 的亮度 溫度

研究方法

演算法建立

■ 分裂視窗法選用

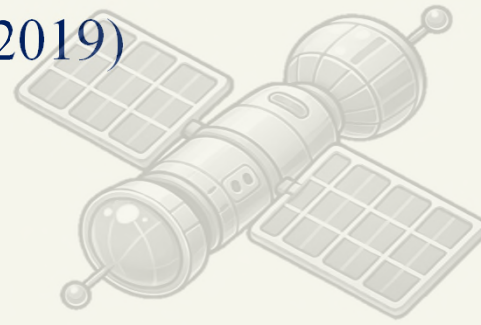
- $SST_1 = a_0 + a_1 T_{11} + a_2 (T_{11} - T_{12})$
(McClain et al., 1985)
- $SST_2 = a_0 + a_1 T_{11} + a_2 (T_{11} - T_{12}) + a_3 (T_{11} - T_{12})(\sec \theta_{sat} - 1)$
(McClain et al., 1985)
- $SST_3 = a_0 + a_1 \left(\frac{T_{11} + T_{12}}{2} \right) + a_2 \left(\frac{T_{11} - T_{12}}{2} \right) + a_3 (T_{11} - T_{12})^2$ (Sobrino et al., 1996)
- $SST_4 = a_0 + a_1 T_{11} + a_2 T_{12} + a_3 (T_{11} - T_{12})^2$
(Fu et.al, 2020)

■ Landsat-8資料轉換(USGS, 2019)

$$T_{\lambda} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)}$$

$$L_{\lambda} = M_L \cdot DN + A_L$$

$$\rho_{\lambda}' = M_{\rho} \cdot DN + A_{\rho}, \rho_{\lambda} = \frac{\rho_{\lambda}'}{\cos(\theta_{SZ})}$$

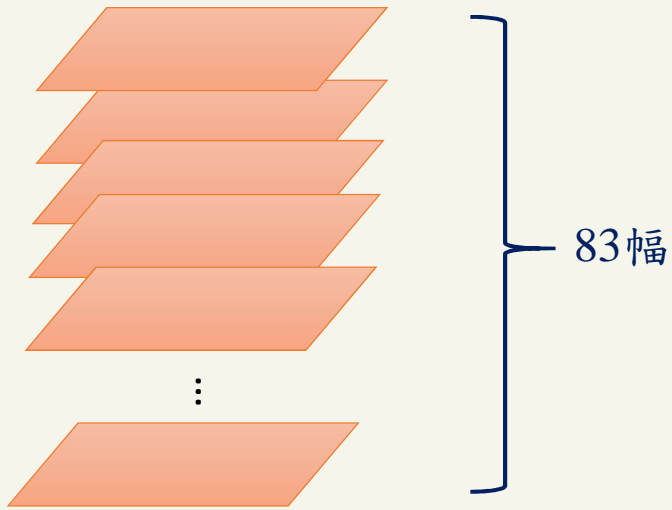


代號	意義	代號	意義
T_{λ}	不同熱紅外波段下大氣層頂亮度溫度(K)	M_{ρ}, A_{ρ}	轉換為大氣層頂反射率的縮放量與增益量
K_1, K_2	不同熱紅外波段對應的轉換常數	ρ_{λ}'	大氣層頂反射率
L_{λ}	大氣層頂輻射強度 ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$)	θ_{SZ}	太陽天頂角($^{\circ}$)
M_L, A_L	轉換為大氣層頂輻射強度的縮放量與增益量	ρ_{λ}	經太陽天頂角校正的大氣層頂反射率
DN	衛星觀測的數位訊號		
θ_{sat}	衛星天頂角		

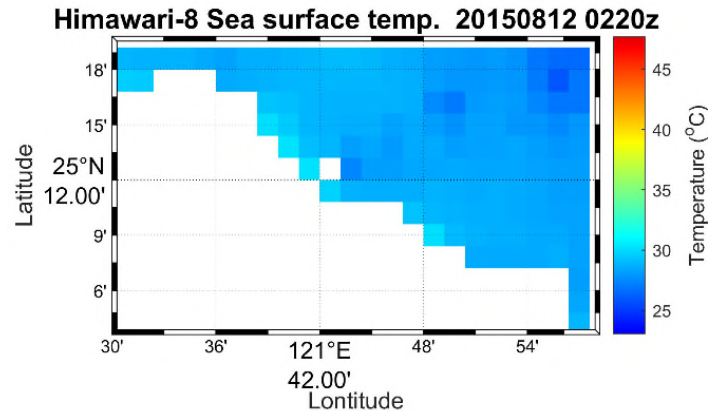
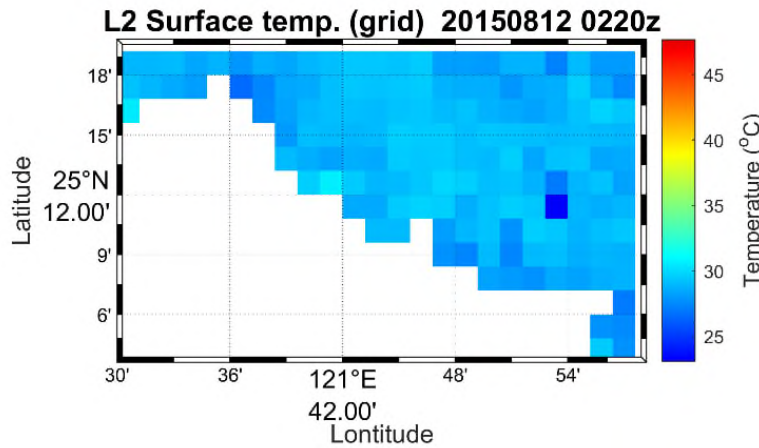
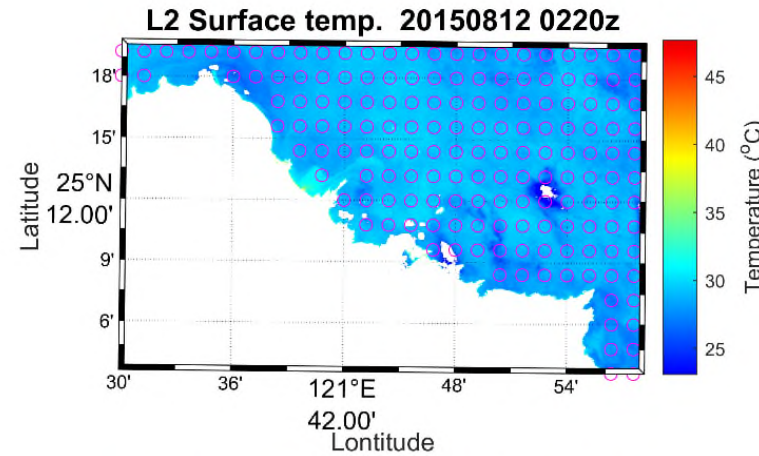
研究方法

Landsat-8資料內插

像素品質資料(QA pixel)



海面上像素品質資料標記為
晴空水體比例 > 80%



■ 相關性與誤差分析

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - f_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

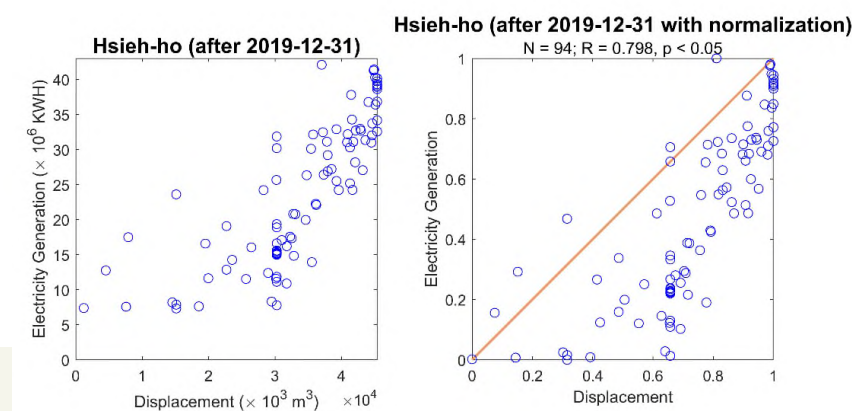
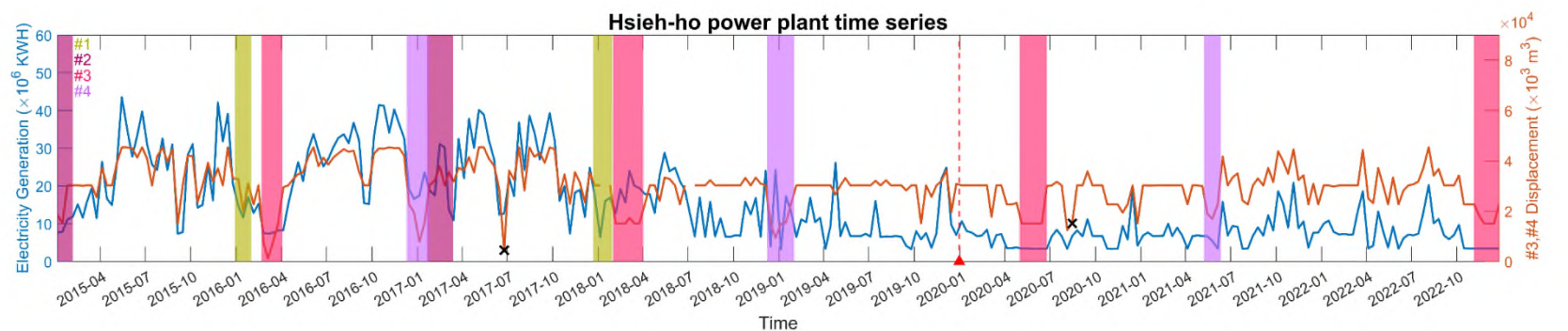
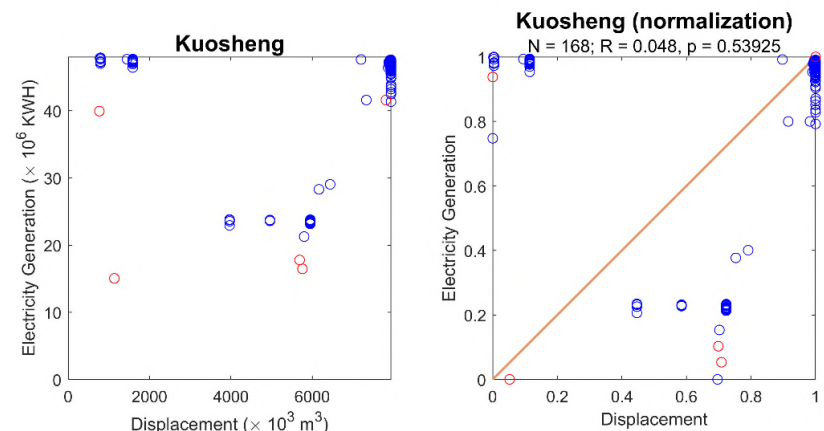
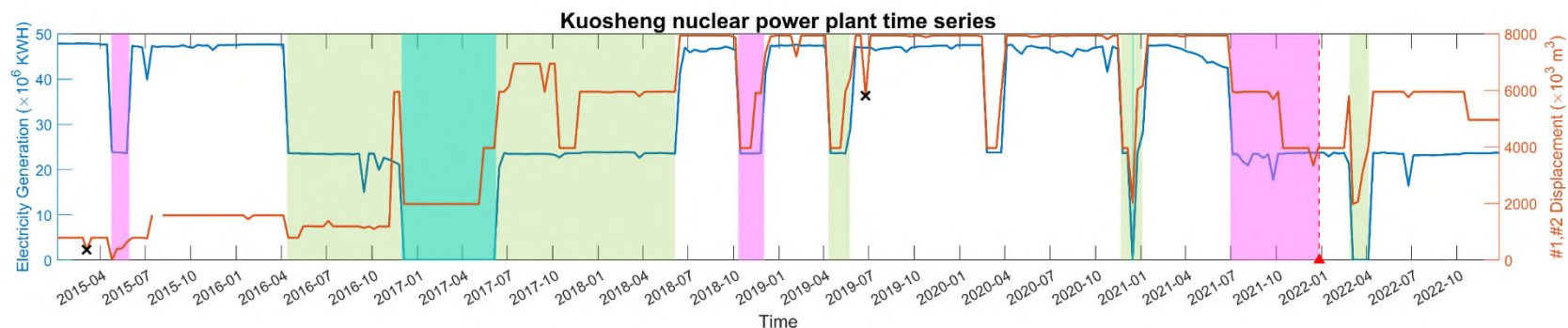
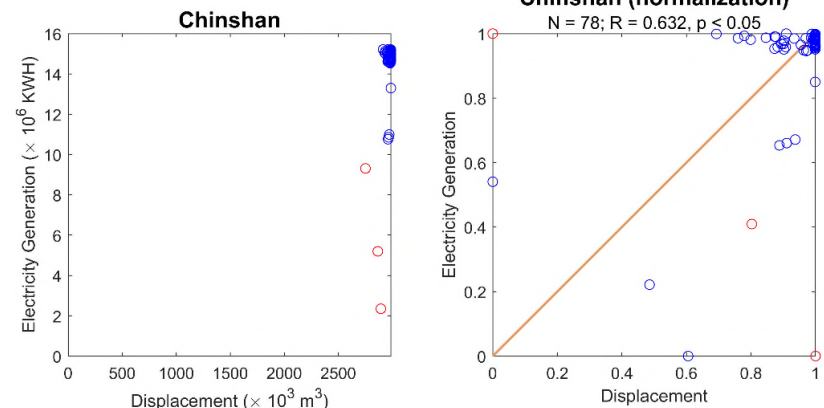
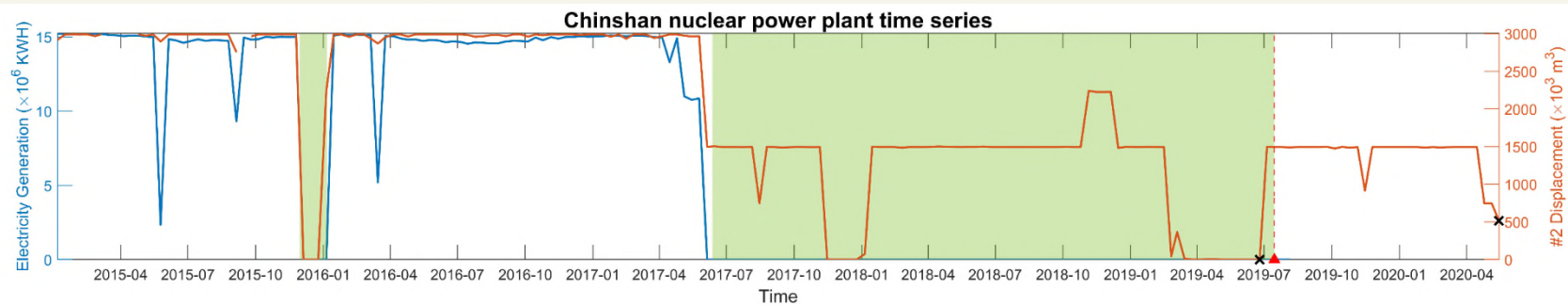
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(f_i - \bar{f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2}}$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(f_i - y_i)^2}{n}}$$

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|f_i - y_i|}{n}$$

$$MAPE = \sum_{i=1}^n \frac{\left| \frac{f_i - y_i}{y_i} \times 100\% \right|}{n}$$

結果與討論

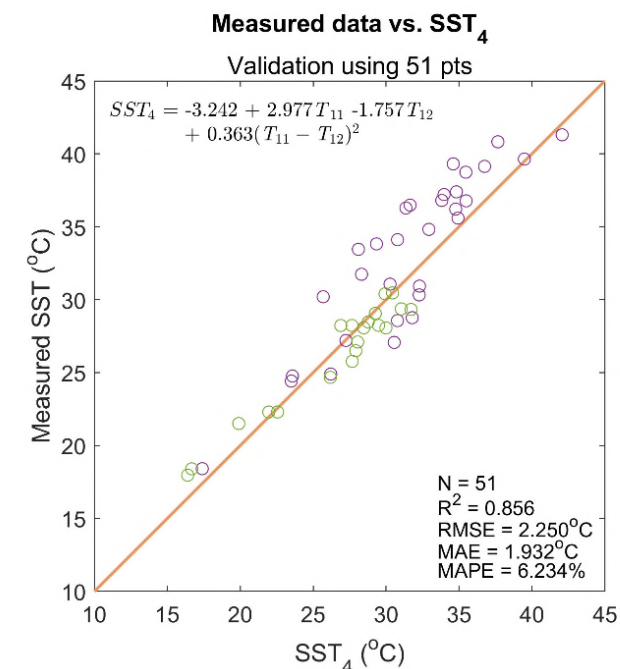
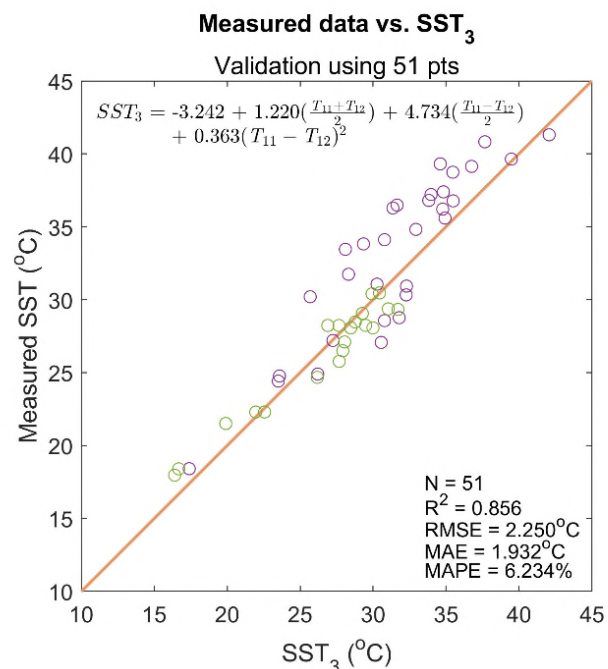
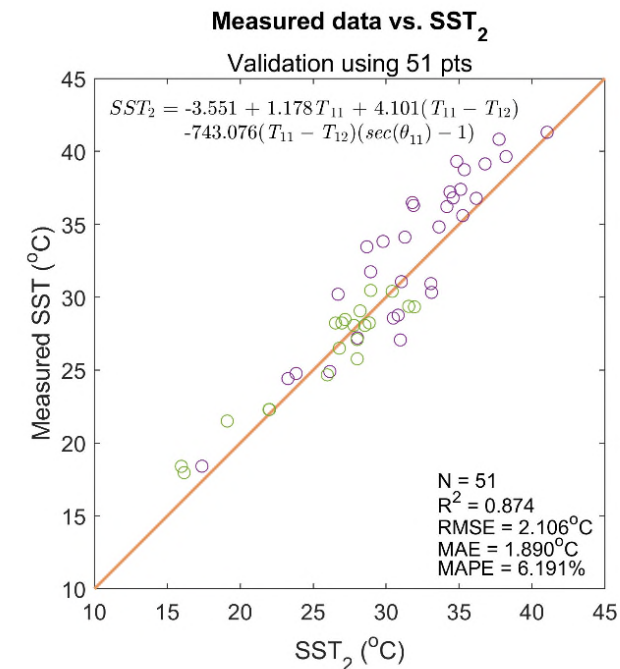
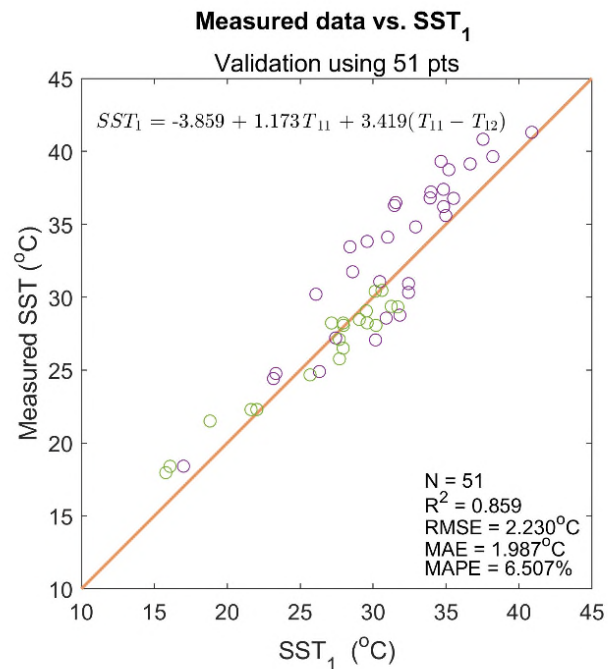


■ 發電量與排水量具有相似的走勢，雖非完全相關但仍會隨發電量變化影響排水量

結果與討論

演算法比較

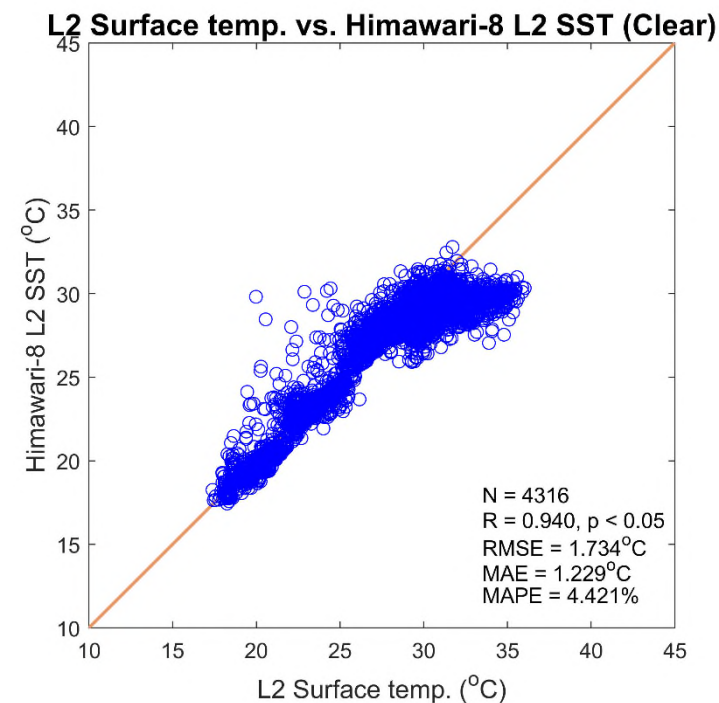
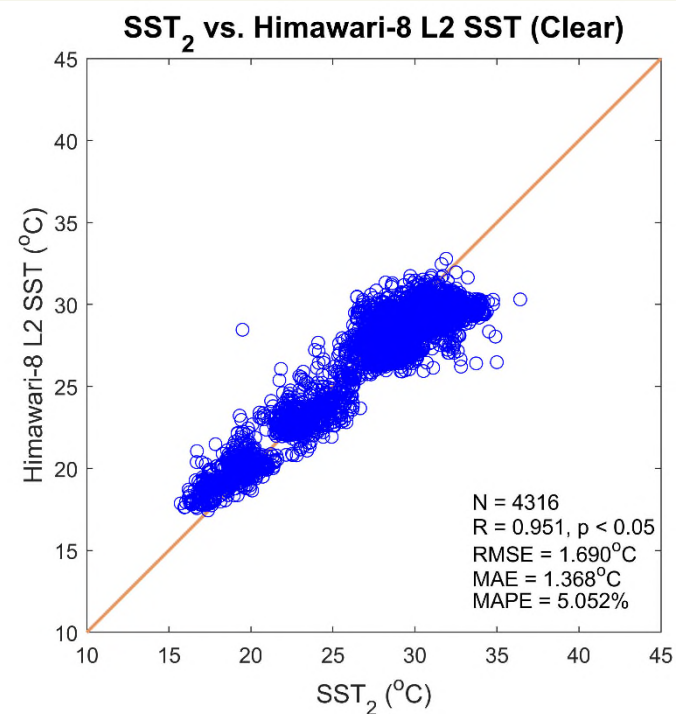
120個迴歸點誤差分析 (發電廠水溫：70筆，浮標海溫：50筆)				
演算法	R^2	RMSE	MAE	MAPE
SST_1	0.865	2.17°C	1.81°C	6.43%
SST_2	0.876	2.08°C	1.71°C	6.08%
SST_3	0.867	2.16°C	1.77°C	6.25%
SST_4	0.867	2.16°C	1.77°C	6.25%
51個驗證點誤差分析 (發電廠水溫：31筆，浮標海溫：20筆)				
演算法	R^2	RMSE	MAE	MAPE
SST_1	0.859	2.23°C	1.99°C	6.51%
SST_2	0.874	2.11°C	1.89°C	6.19%
SST_3	0.856	2.25°C	1.93°C	6.23%
SST_4	0.856	2.25°C	1.93°C	6.23%



結果與討論

Landsat-8 Level 2 表面溫度比較

Himawari-8 Level 2海表面溫度(4316筆)				
	r	RMSE	MAE	MAPE
SST_2	0.951	1.69°C	1.37°C	5.05%
Landsat-8 Level 2 表面溫度	0.940	1.73°C	1.23°C	4.42%



結果與討論

Landsat-8 Level 2 表面溫度比較

發電廠水溫(101筆)

	r	RMSE	MAE	MAPE
SST_2	0.912	2.54°C	2.20°C	7.22%
Landsat-8 Level 2 表面溫度	0.808	3.66°C	2.94°C	9.42%

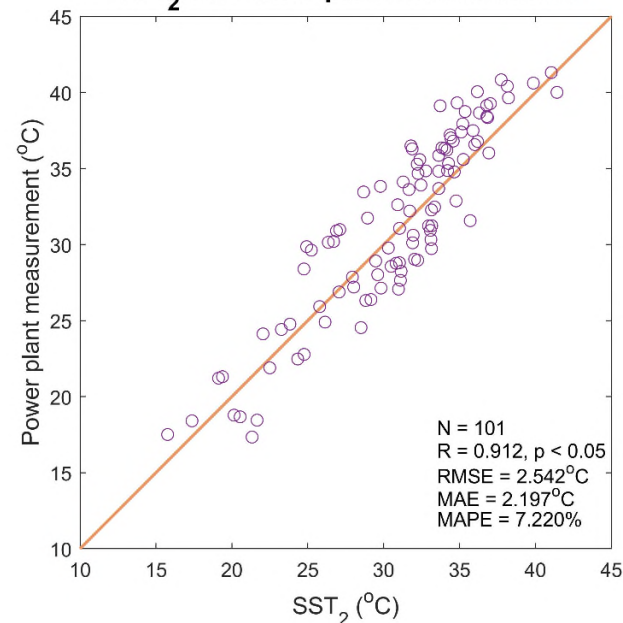
浮標海溫(70筆)

	r	RMSE	MAE	MAPE
SST_2	0.962	1.29°C	1.04°C	4.16%
Landsat-8 Level 2 表面溫度	0.952	2.08°C	1.64°C	6.31%

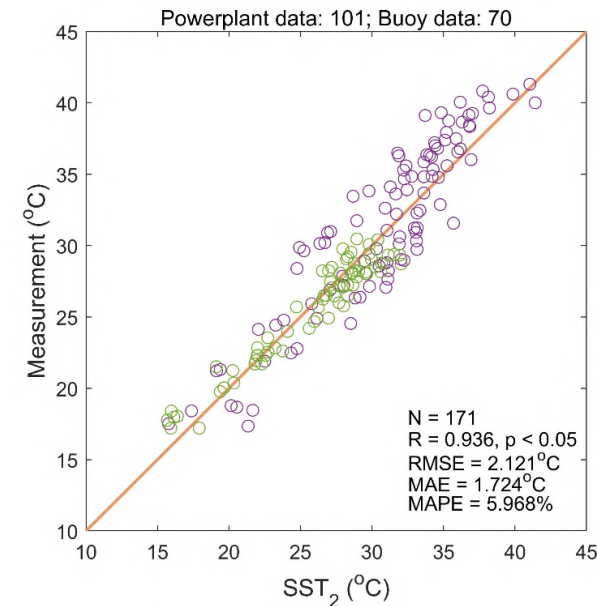
實測資料(發電廠水溫+浮標海溫)

	r	RMSE	MAE	MAPE
SST_2	0.936	2.12°C	1.72°C	5.97%
Landsat-8 Level 2 表面溫度	0.856	3.11°C	2.41°C	8.15%

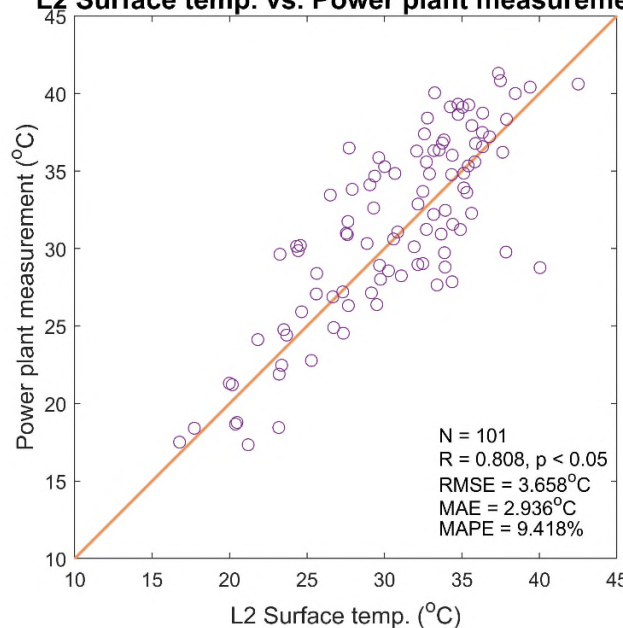
SST₂ vs. Power plant measurement



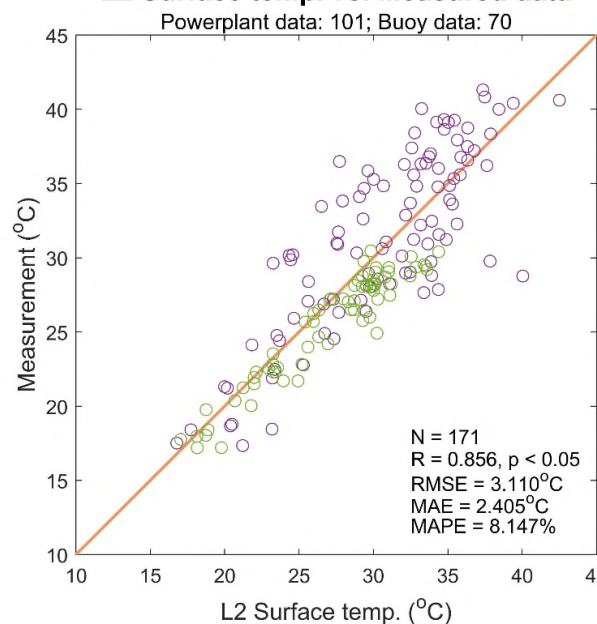
SST₂ vs. Measured data



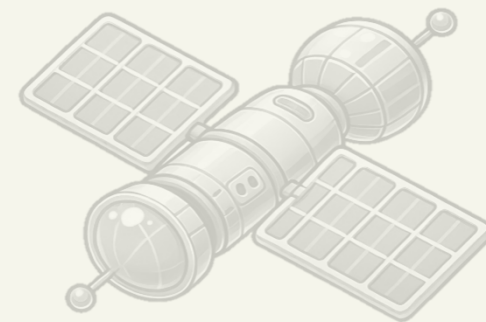
L2 Surface temp. vs. Power plant measurement



L2 Surface temp. vs. Measured data



結果與討論



溫排水分布

核二廠			
日期	潮位狀態	背景溫度	發電量(KWH)
2015/07/27	退潮	32.17°C	46870000
2016/07/29	退潮	32.35°C	23403000
2019/04/17	退潮	23.78°C	23644000
2019/11/11	退潮	22.93°C	47404000



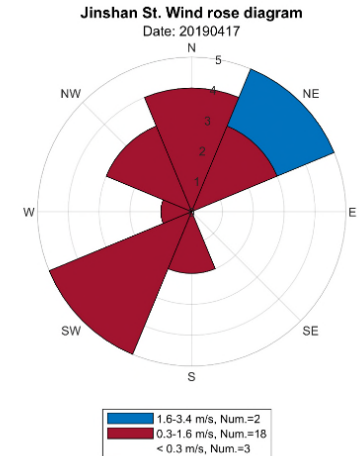
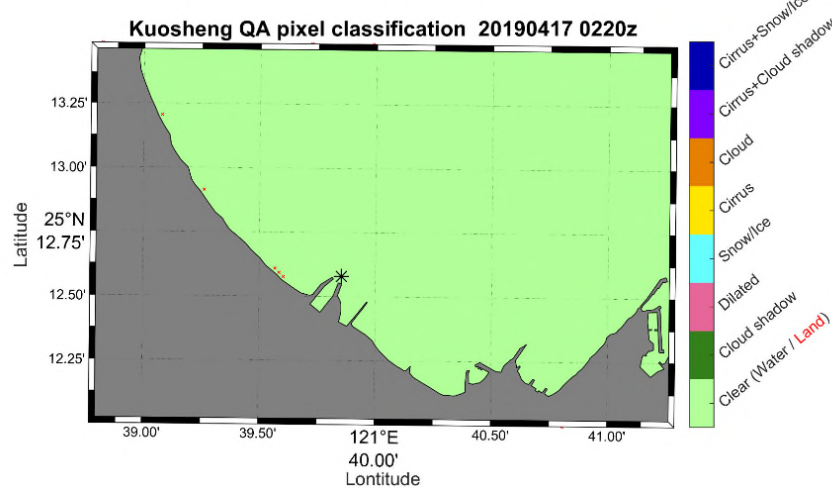
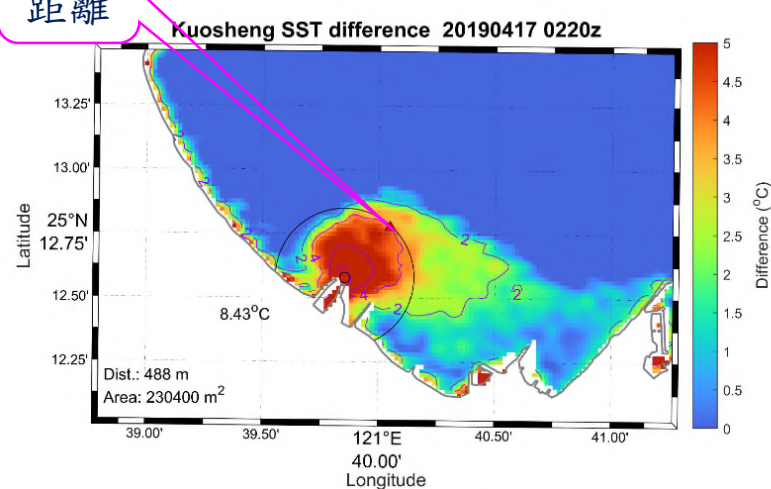
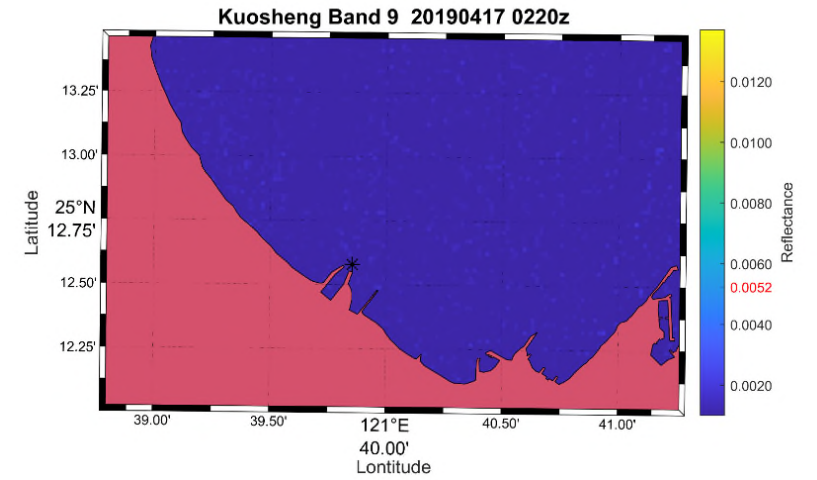
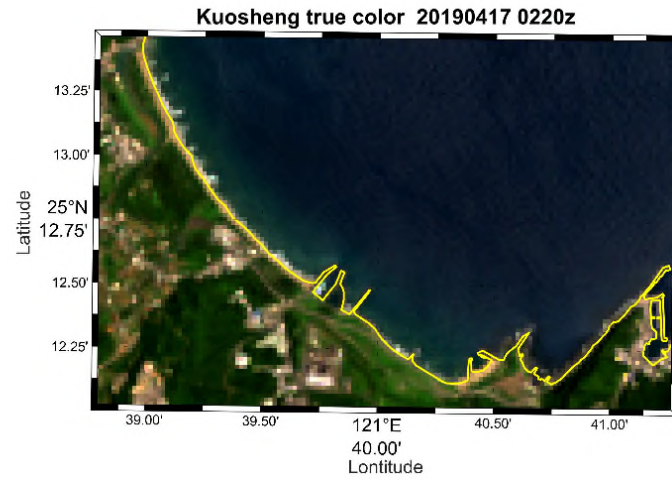
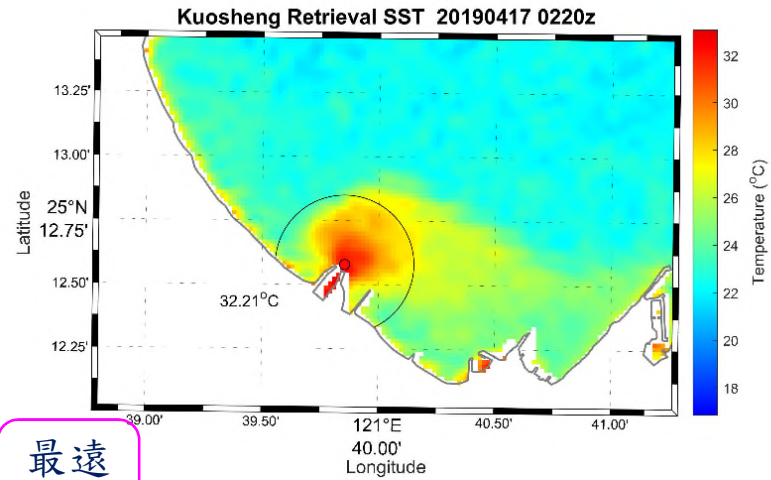
協和發電廠			
日期	潮位狀態	背景溫度	發電量(KWH)
2016/06/27	漲潮	31°C	34403300
2021/09/13	漲潮	30.75°C	12519700
2017/09/18	退潮	31.23°C	19465000
2019/10/10	退潮	28.17°C	6645800



結果與討論

■ 2019/04/17核二廠：風速1.4 m/s，風向為東北風

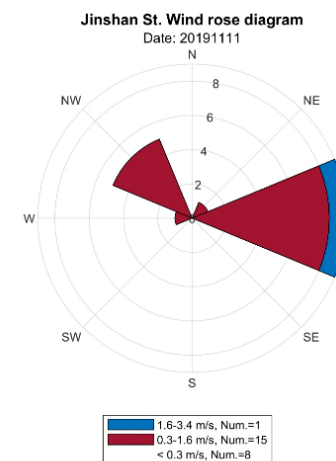
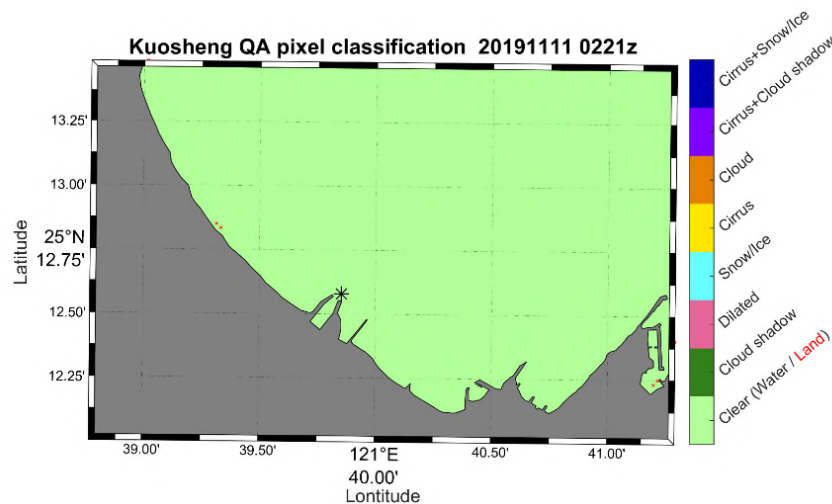
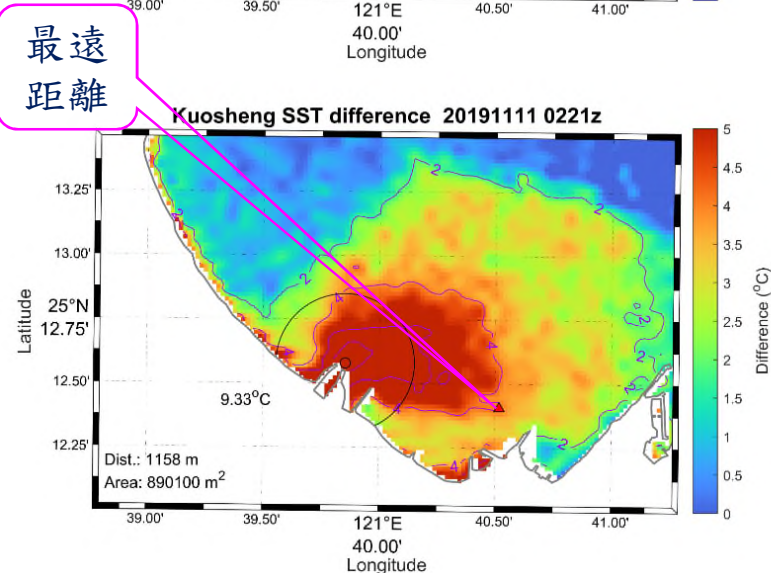
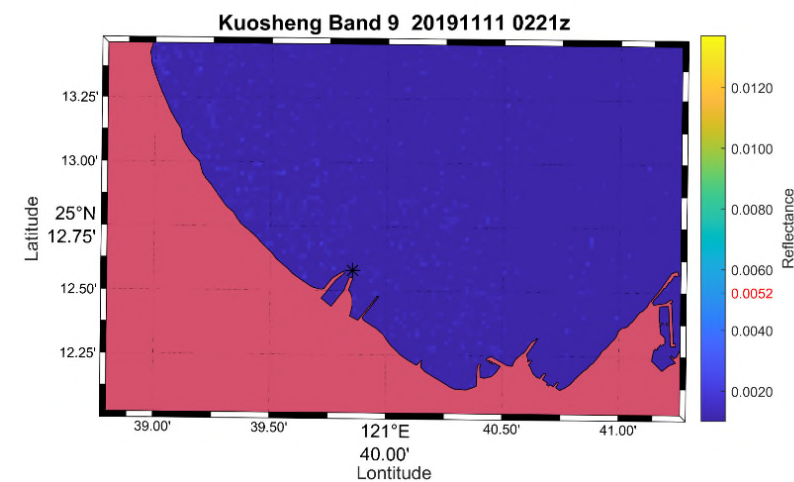
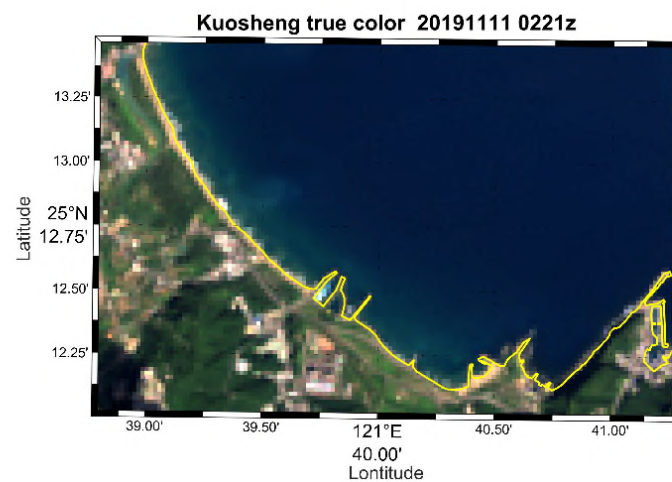
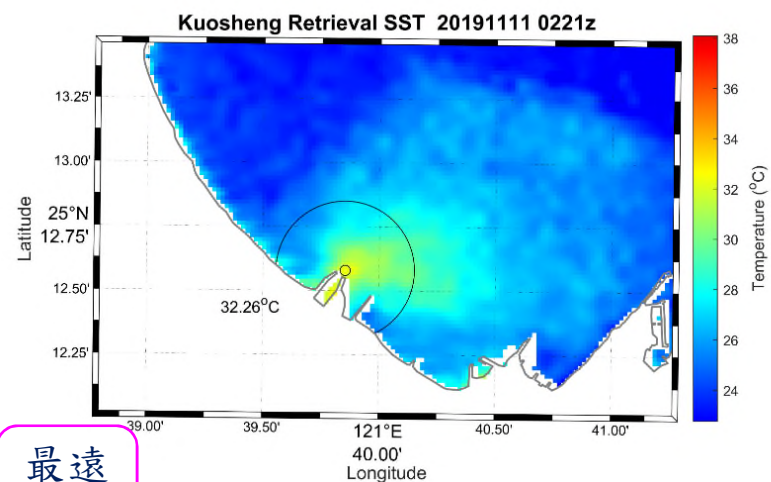
- 二號機停機，升溫面積減少，受退潮影響升溫超過2°C區域被帶向外海，大於4°C面積230400 m²，最遠距離488 m



結果與討論

■ 2019/11/11核二廠：風速0.4 m/s，風向為東風

➢ 受退潮影響，升溫超過2°C區域向外海擴散，大於4°C面積890100 m²，最遠距離1158 m

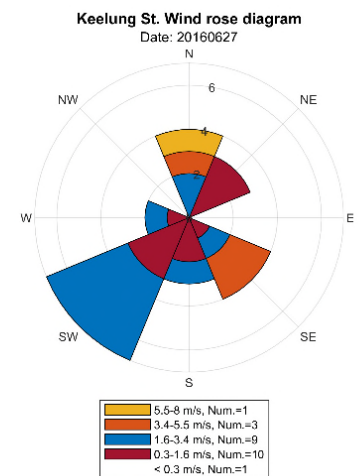
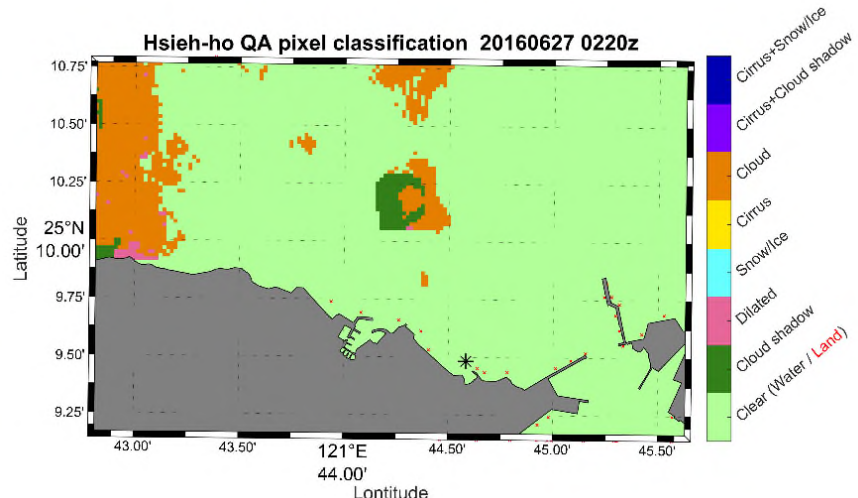
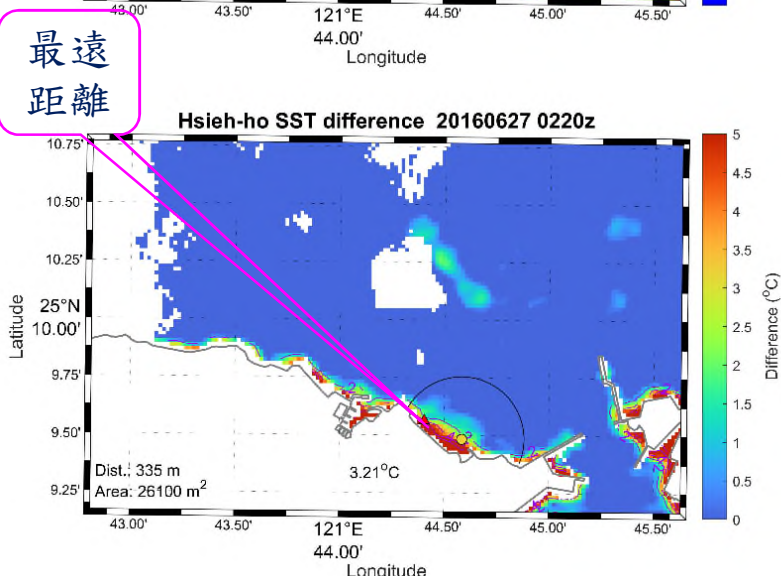
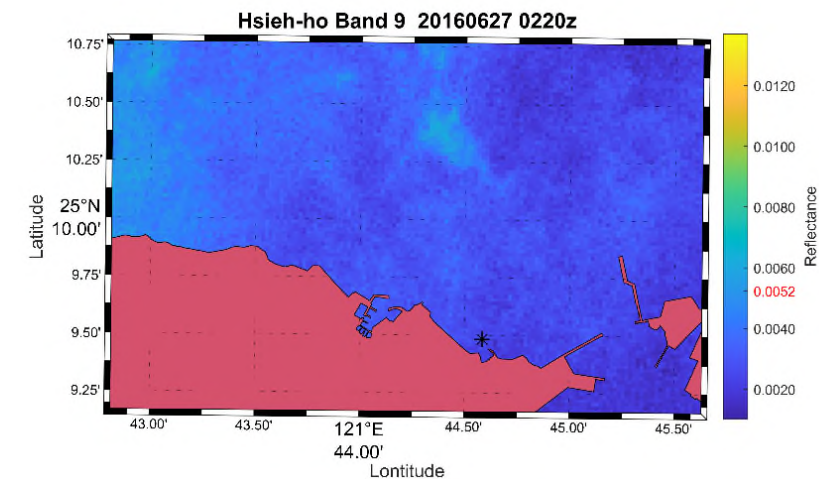
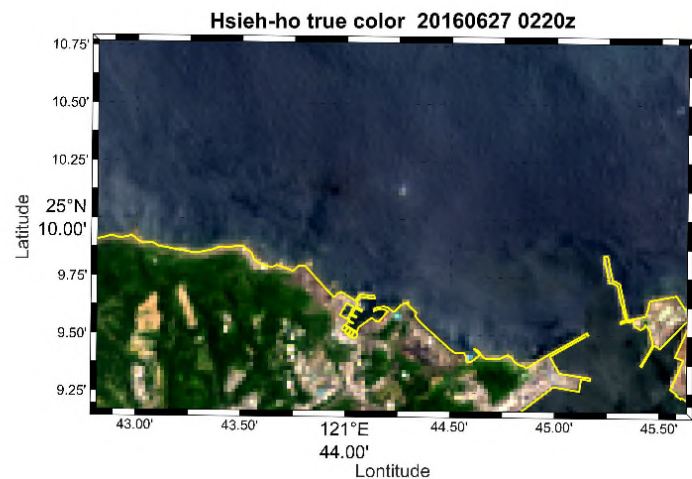
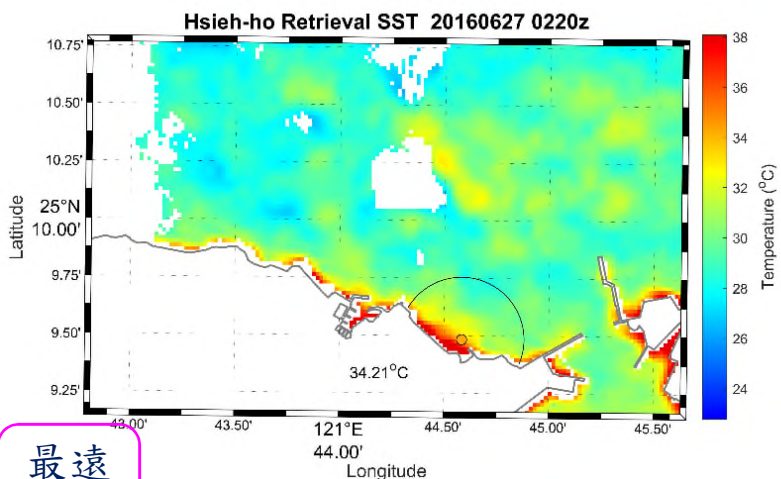


最遠距離

結果與討論

■ 2016/06/27協和發電廠：風速3.4 m/s，風向為東南風

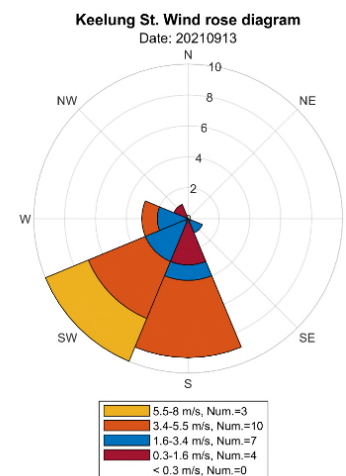
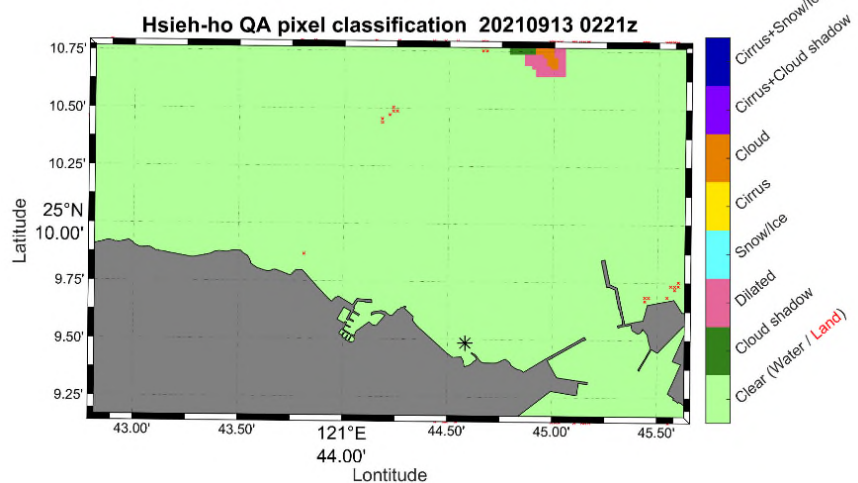
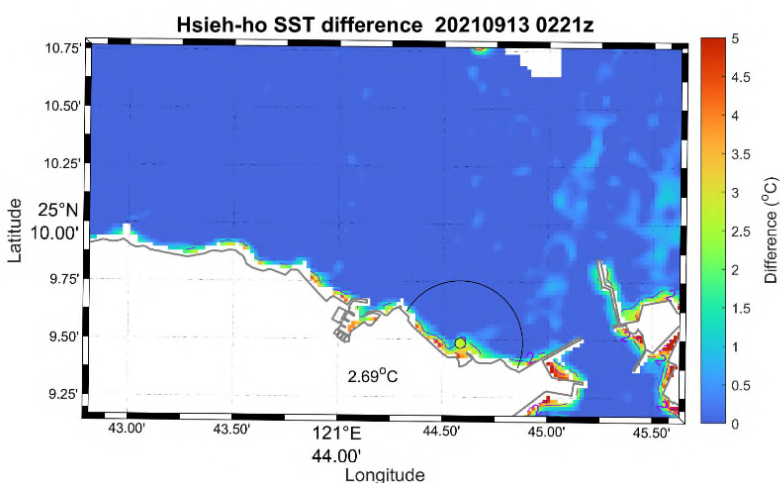
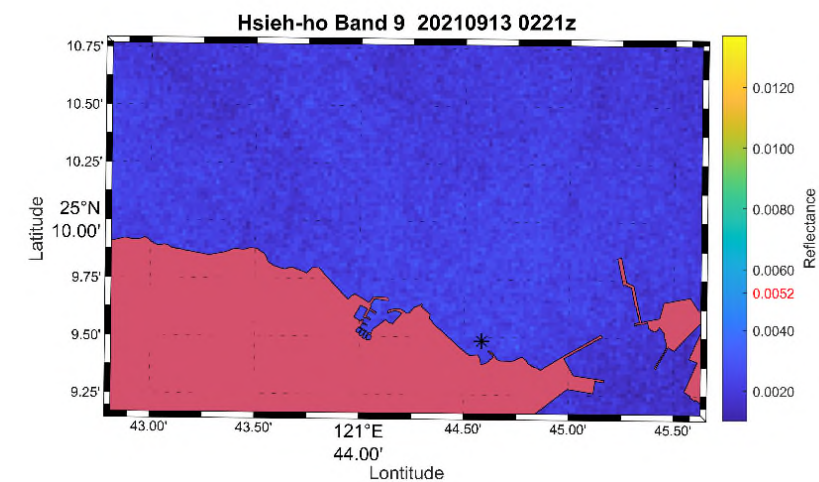
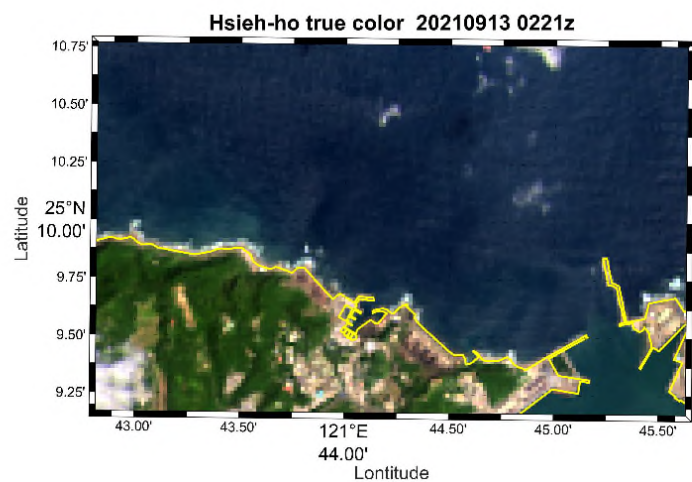
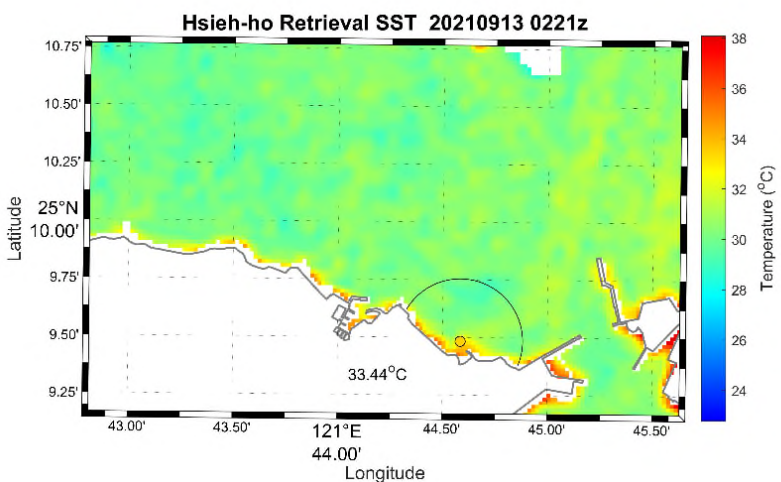
➢ 卷雲反射率偏高，受漲潮影響升溫集中於出水口附近，大於4°C面積26100 m²，最遠距離335 m



結果與討論

■ 2021/09/13協和發電廠：風速3.5 m/s，風向為南風

➢ 部分區域有雲；一號機與二號機除役使得升溫面積不明顯，受漲潮影響，升溫超過4°C區域集中於出水口沿岸

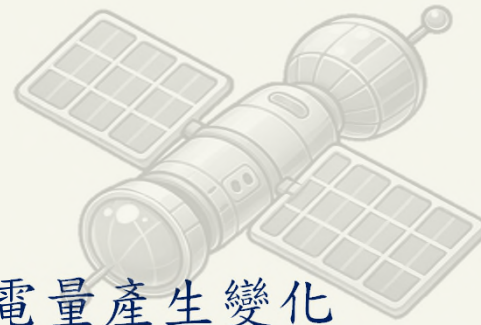


結果與討論

核二廠							
日期	潮位狀態	背景溫度	發電量 (KWH)	升溫超過4°C 面積(m ²)	升溫超過4°C 最遠距離(m)	升溫超過2°C 面積(m ²)	升溫超過2°C 最遠距離(m)
2015/07/27	退潮	32.17°C	46870000	347400	713	1938600	2161
2016/07/29	退潮	32.35°C	23403000	9000	150	444600	2095
2019/04/17	退潮	23.78°C	23644000	230400	488	748800	1174
2019/11/11	退潮	22.93°C	47404000	890100	1158	3815100	2325

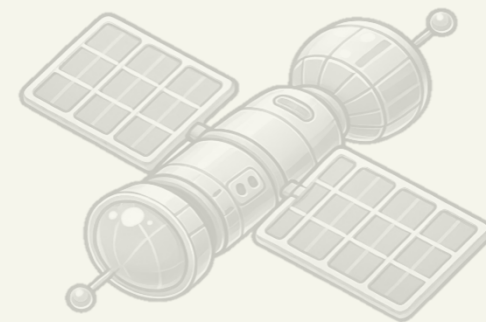
協和發電廠							
日期	潮位狀態	背景溫度	發電量 (KWH)	升溫超過4°C 面積(m ²)	升溫超過4°C 最遠距離(m)	升溫超過2°C 面積(m ²)	升溫超過2°C 最遠距離(m)
2016/06/27	漲潮	31°C	34403300	26100	335	55800	516
2021/09/13	漲潮	30.75°C	12519700	-	-	18900	218
2017/09/18	退潮	31.23°C	19465000	21600	376	213300	733
2019/10/10	退潮	28.17°C	6645800	1800	108	13500	417

結論



- 發電量與排水量具有相似的走勢，雖非完全相關但可發現排水量會因發電量產生變化
- 以分裂視窗法迴歸得出的演算法推算出的海表面溫度其準確度較Landsat-8 Level 2表面溫度來得高
- 漲退潮對於溫排水的擴散方向較為明顯，而風向則否，推測與風速大小有關
- 相同潮汐狀態下，發電量的不同可能會影響溫排水的擴散面積





謝謝聆聽

