

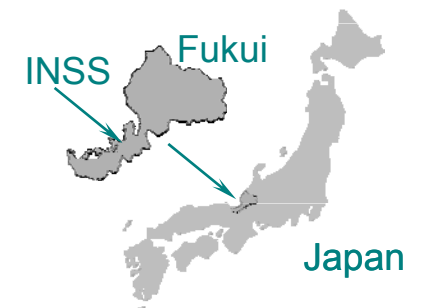
PWR環境における強加工ステンレス 鋼のSCC進展速度

平成23年 3月7日

(株)原子力安全システム研究所



寺地巧、山田卓陽、宮本友樹、有岡孝司





背景：PWR主要系統における応力腐食割れ（SCC）

■ Ni基合金（600合金など）のSCC

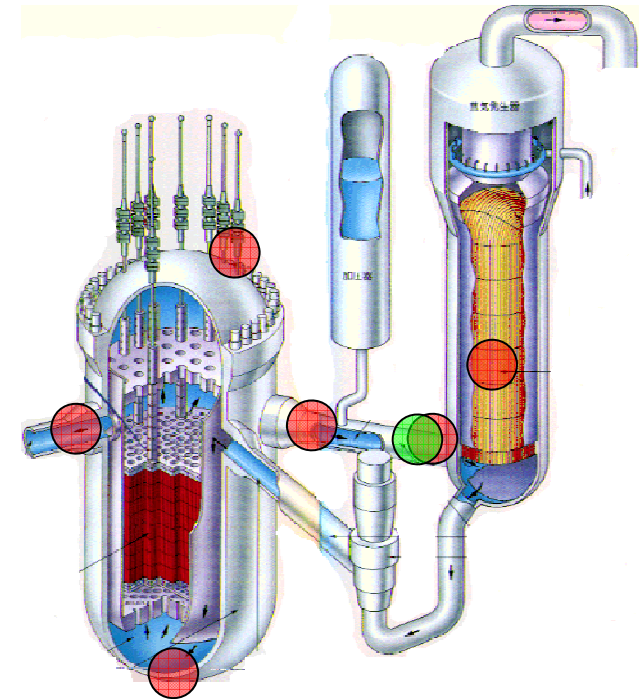
- 蒸気発生器伝熱管
- 原子炉容器上蓋管台
- 蒸気発生器入り口管台
- etc

■ ステンレス鋼のSCC

- IASCCや酸素滞留部のSCCを除き、最近まで報告例が無かった。

⇒割れ感受性が低いと考えられていた。

2007年に美浜発電所でステンレス鋼にも傷が確認された。



PWRでのSCC

●:Ni基合金SCC報告部位

● ステンレス鋼の傷
(2007年美浜2号機)



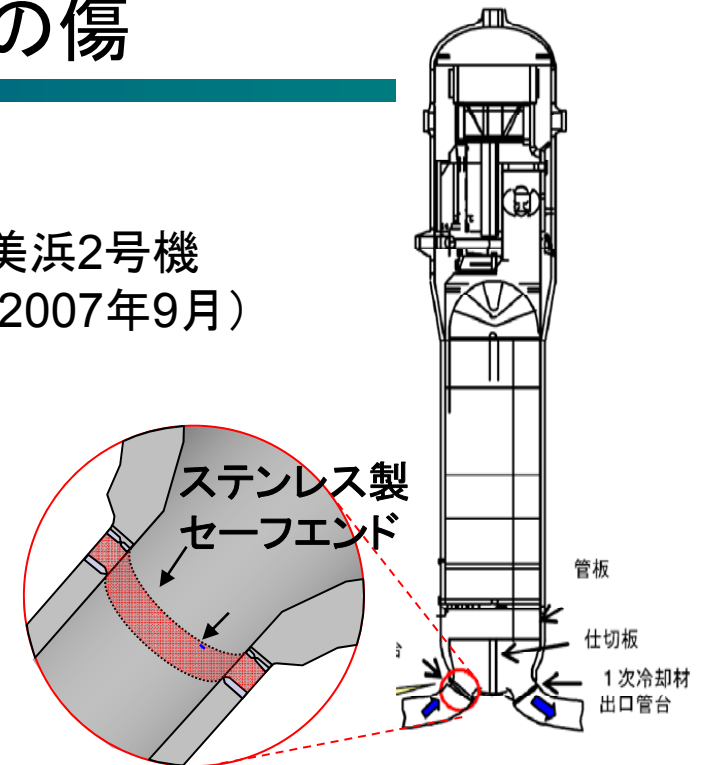
背景：美浜2号機でのステンレス鋼の傷

- 蒸気発生器管台を接合しているステンレス製(SUS316)セーフエンドの溶接接合部(HAZ部)に粒界型の割れ

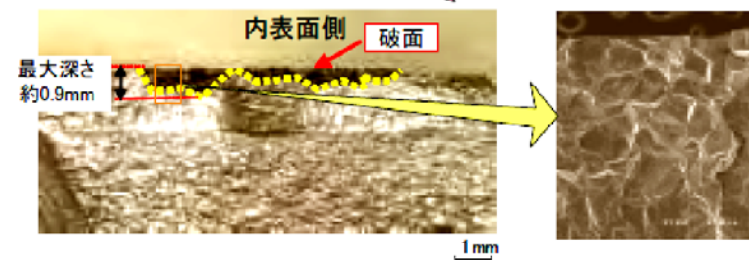


信頼性向上には、ステンレス鋼のSCCへの知見拡充が必要。

美浜2号機
(2007年9月)



破面観察



(出典：経済産業省ホームページ2008年2月)



背景：原子力安全システム研究所 (INSS) 取り組み

INSSでは2000年頃から、実機の割れに先行した検討を開始。

INSSでのステンレス鋼のSCC研究

■ SCC感受性評価

- SSRT試験⇒**実験室的に割れ感受性があることを確認**

■ き裂進展速度評価

- 影響因子の評価(冷間加工・応力・温度)
- 溶接熱影響部の検討

■ メカニズム研究

- 腐食機構の研究
- クリープ機構等



研究目的

- 強加工ステンレス鋼の応力腐食割れ進展速度を計測する。
また、き裂進展速度に及ぼす以下のパラメータについて体系的なデータを取得する。

- (1)冷間加工度
- (2)温度
- (3)応力
- (4)材料種(SUS316,SUS304)
- (5)加工方位
- (6)鑄造ステンレス鋼
- (7)溶接金属
- (8)溶接熱影響部

今回報告する内容



試験方法：供試材

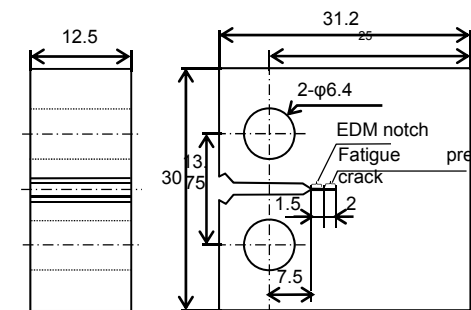
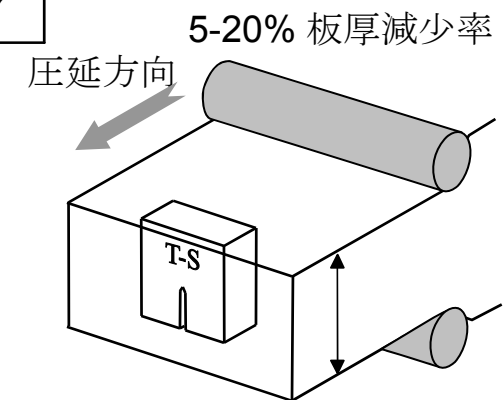
供試材の化学成分 (重量%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
SUS316	0.047	0.45	1.42	0.024	0.001	11	16.45	2.07
SUS304	0.04	0.31	1.59	0.031	0.001	9.21	18.34	0.37

(熱処理：SUS316: 1080°C、SUS304：1100°C、水冷)

供試材の機械的特性

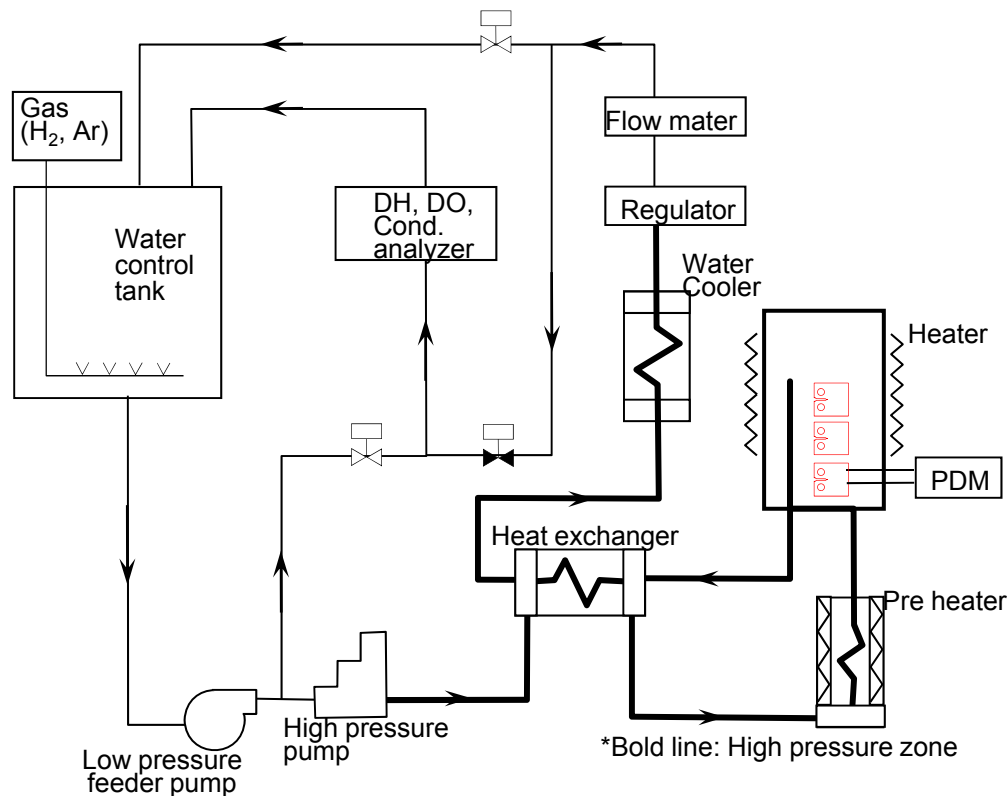
	冷間加工度 (320°C)	耐力 N/mm ² (320°C)	引張強さ N/mm ² (320°C)	伸び% (320°C)	HV (1kg)
SUS316	5	243	458	36	184
	10	345	495	29	219
	15	495	565	15	254
	20	572	607	10	270
SUS304	5	270	434	38	205
	10	365	466	32	214
	15	436	503	24	243
	20	498	564	16	267



0.5T CT試験片



試験方法：試験装置の構成



試験装置の構成

■ 試験環境:

PWR1次系模擬環境

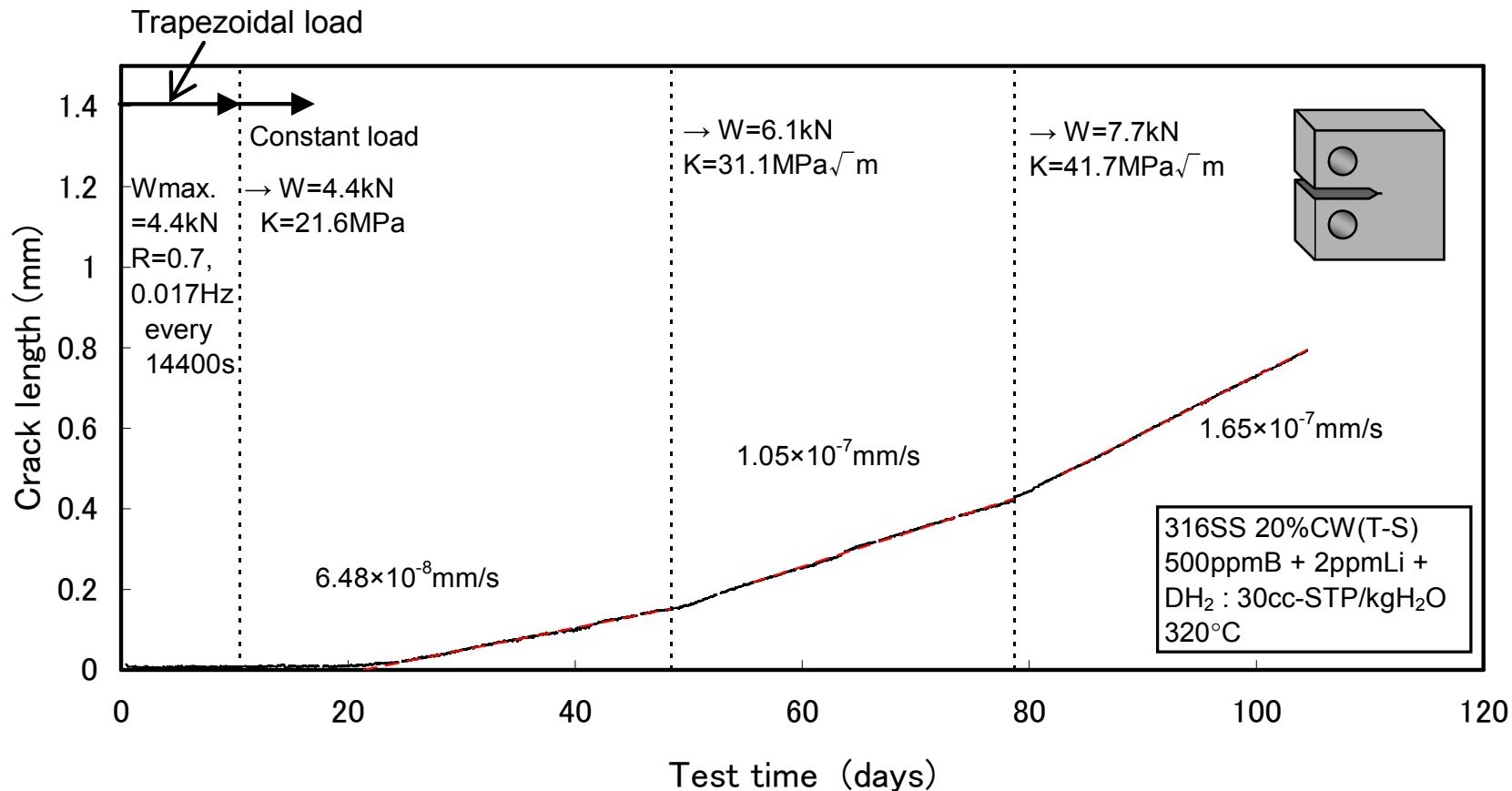
500ppmB, 2ppmLi,
30cc-STP/kg·H₂O DH₂
270-360°C

■ 応力条件

$K=25-40\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$



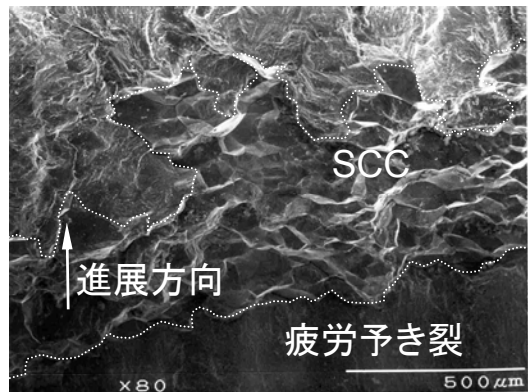
試験方法：き裂進展速度の計測



- 320°C以下の試験はPDM(電位差法)を適用
- 試験開始時に台形波による粒界へのき裂進展を誘導
- き裂進展速度は破面から補正



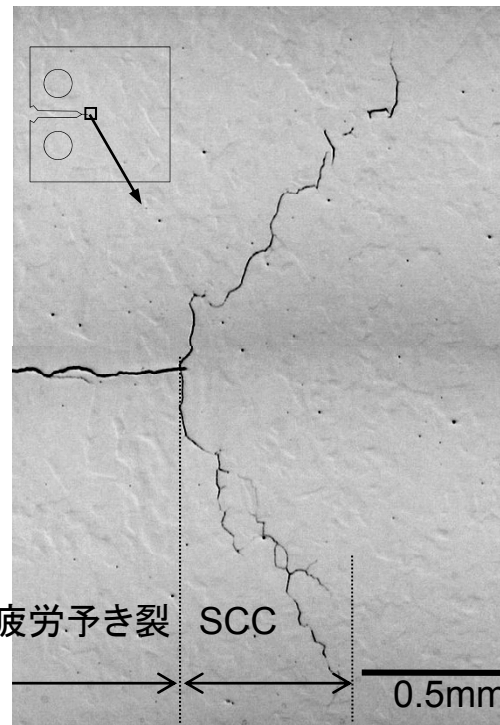
試験結果の評価：破面観察結果



破面のSEM観察結果



破面の外観



破面の断面

き裂進展試験結果の一例 316SS (20%CW, T-S),
環境：500ppmB + 2ppmLi + DH₂: 30cc-STP/kgH₂O,
320° C

- き裂は粒界を選択的に進展
- T-S方位のき裂は2方向に分岐する
- き裂進展長さは板厚方向の長さを採用

SUS316

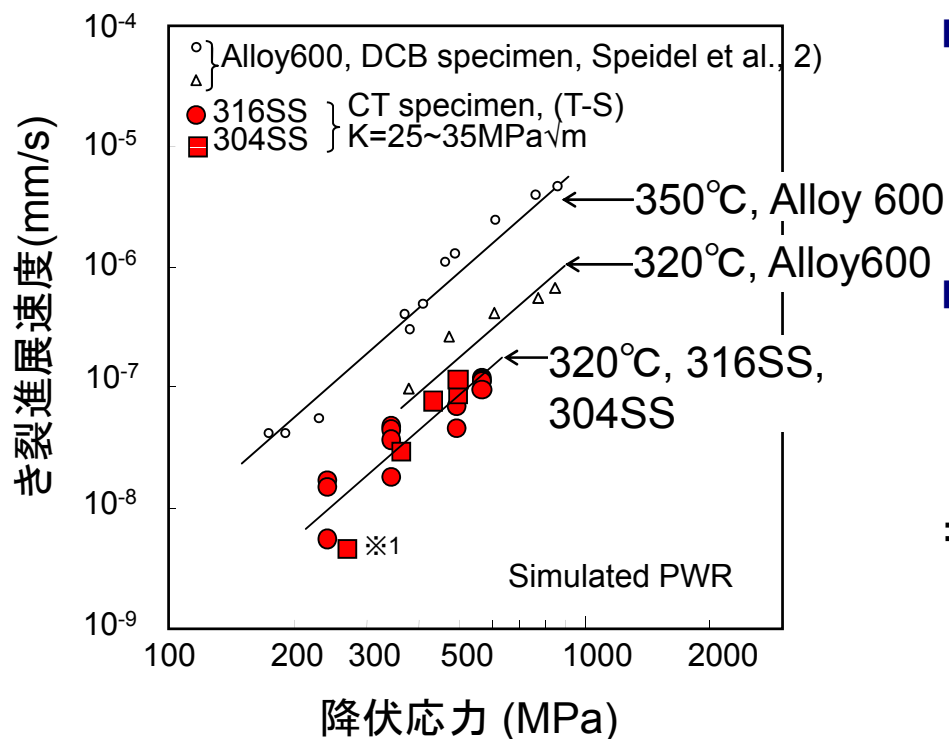
- 38個の試験片を用い83条件のき裂進展速度を評価

SUS304

- 16個の試験片により51条件のき裂進展速度を評価

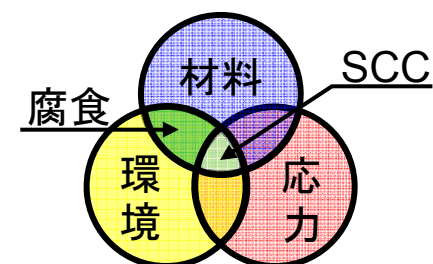


き裂進展速度への冷間加工(降伏応力)の影響



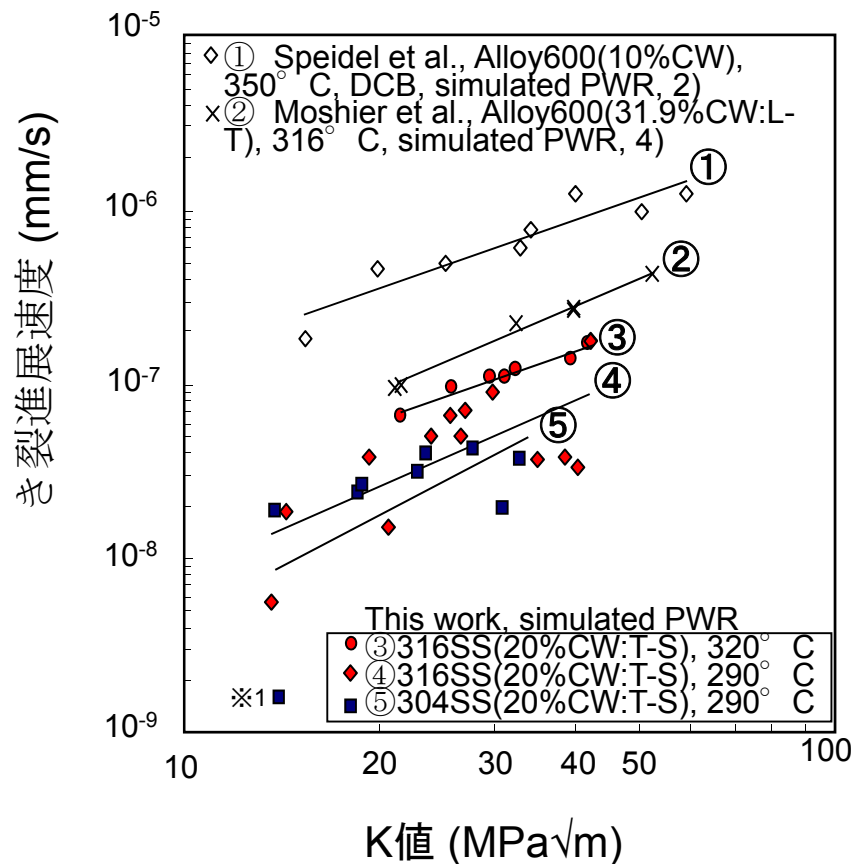
※1: 5×10^{-9} mm/s以下であり、信頼性が低いデータ

- 降伏応力の増加と共に進展速度が増加
- 腐食挙動の異なる Alloy600と同様の降伏応力依存性が確認された。
⇒ 応力の影響と推察される。



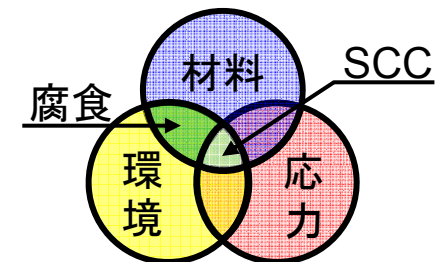


き裂進展速度への応力の影響



- き裂進展速度はK値の1乗～2乗に比例するデータが報告されている。(600合金のデータと近い挙動)

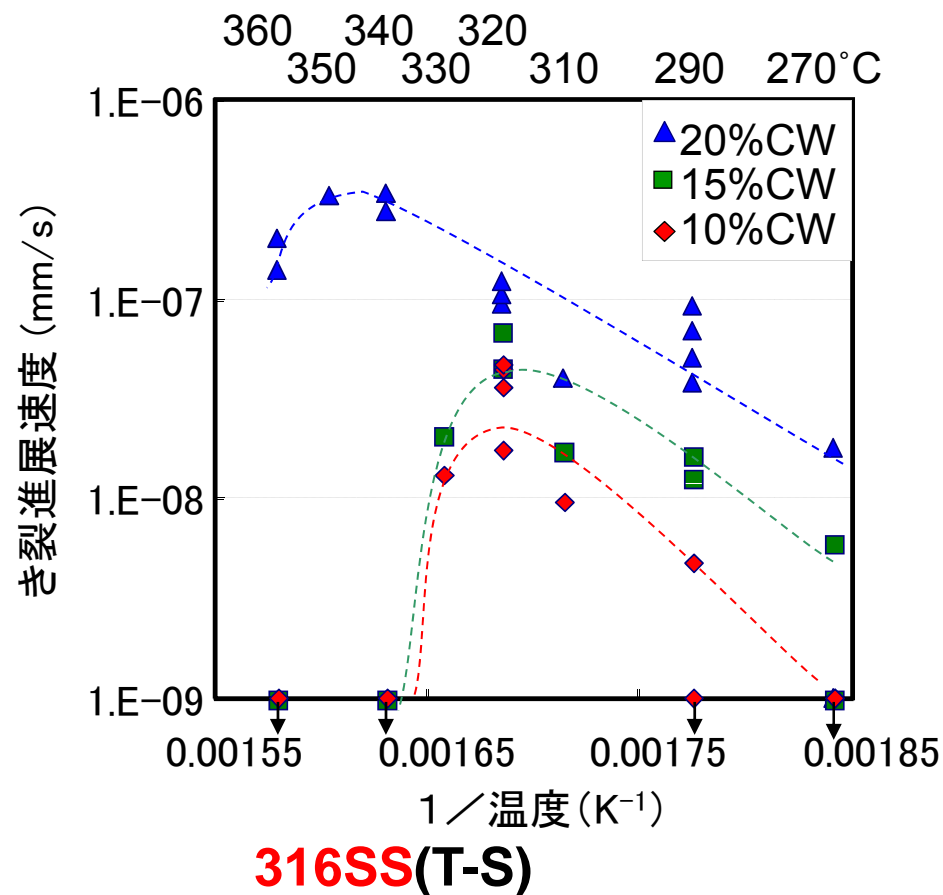
※1: 5×10^{-9} mm/s以下であり、信頼性が低いデータ





き裂進展速度への温度の影響

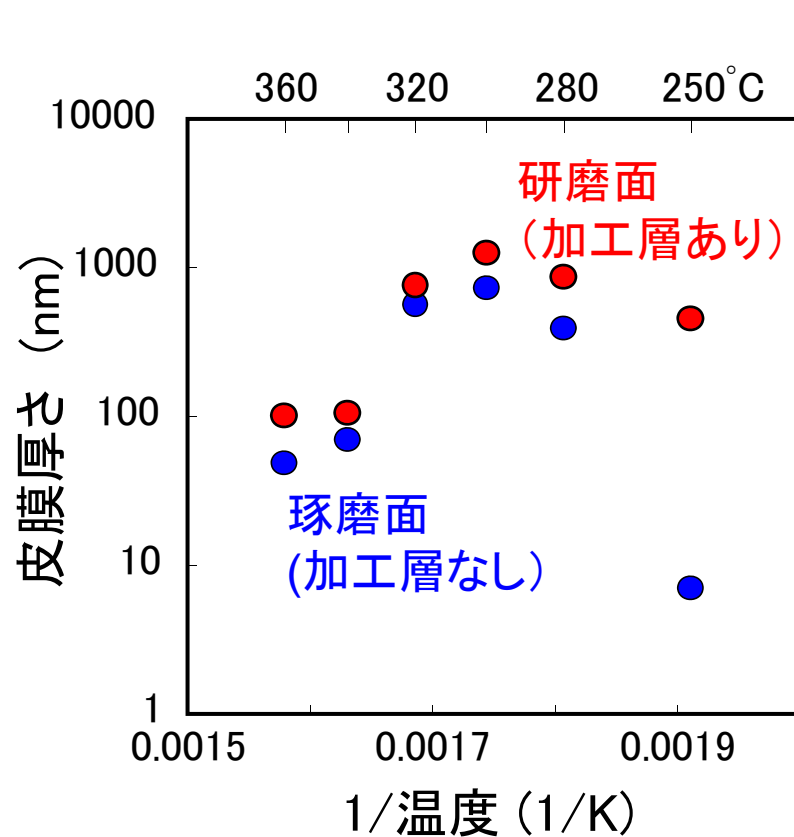
B:500ppm, Li:2ppm, DH:30cc, K=25-36MPa√m



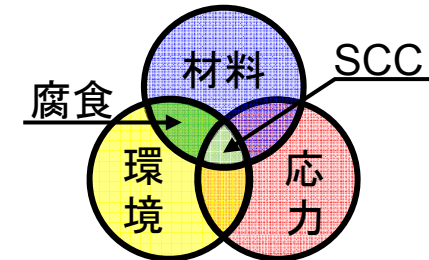
- 低温から320°Cまではアレニウス型の温度依存性
- 高温側で進展速度が低下する傾向が認められた。



温度の影響に関する考察(皮膜厚さの温度依存性)



SUS316, 500ppmB+2ppmLi
DH:30cc-STP/kg-H₂O

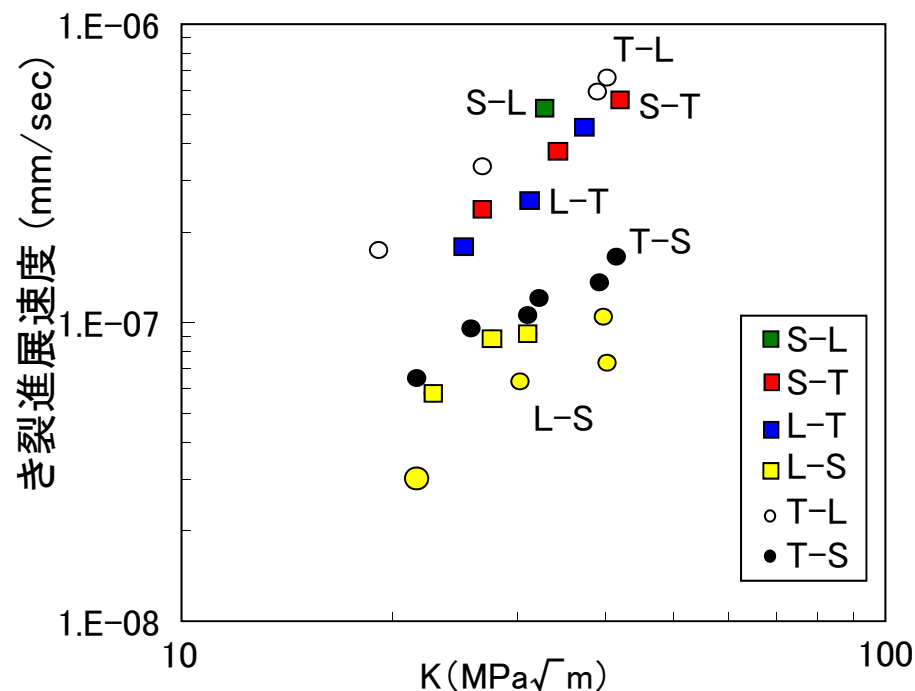


- 300°C付近に皮膜厚さのピークが認められる。
- 進展速度のピークは腐食により説明可能。

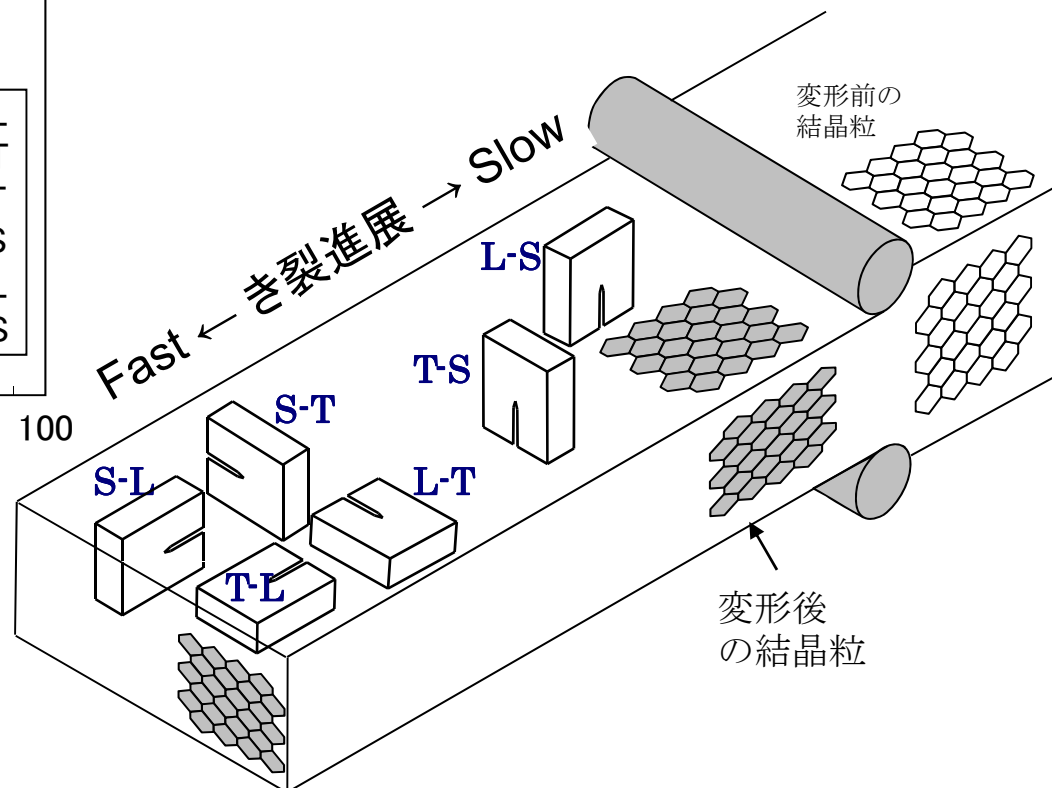


き裂進展速度への加工方位の影響

SUS316, 20%CW,
500ppmB+2ppmLi
DH:30cc-STP/kg-H₂O



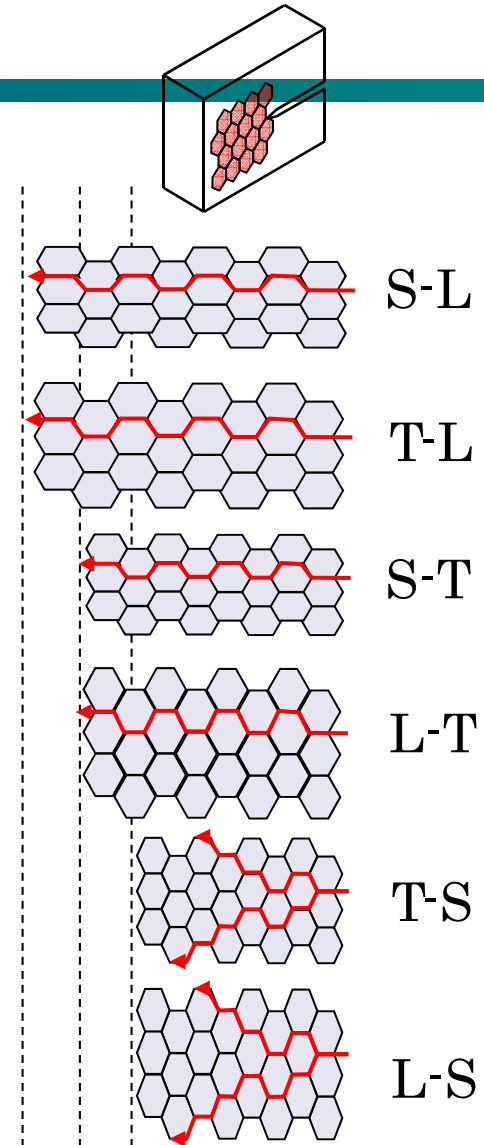
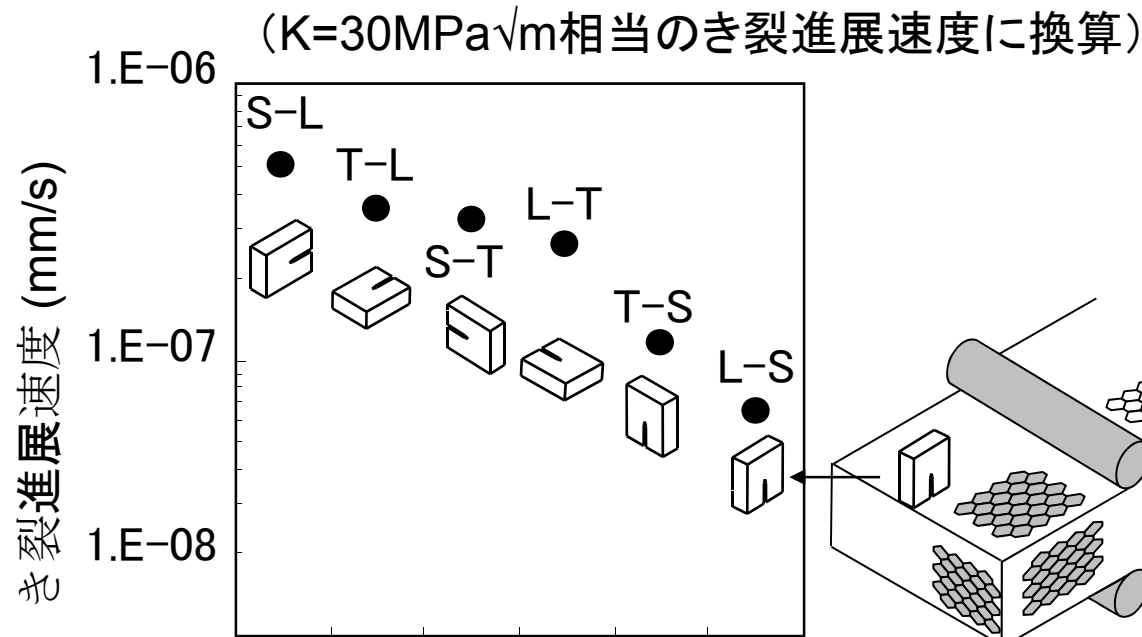
き裂進展速度への
加工方位の影響



- 最大で一桁程度の加工方位依存性が認められた。



加工方位の影響に関する考察

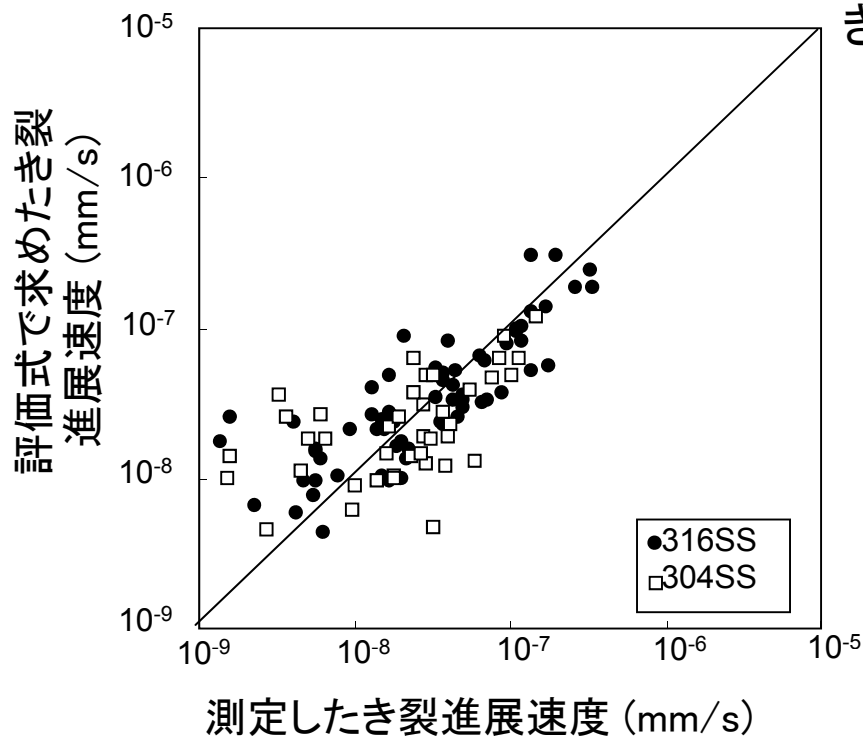


- 結晶粒の変形状態などが割れ速度に影響か
 (1) 通過する三重点の数、(2)微小領域のK値、(3)解放される破面の面積、(4)機械的特性など

き裂断面の割れ経路



評価式の作成(T-S方位のき裂進展速度)



き裂進展速度

$$= 7.7 \times 10^8 \times \underbrace{\sigma_y^{2.9}}_{\text{①}} \times \underbrace{K^{1.2}}_{\text{②}} \times \underbrace{\exp\left\{\frac{-87 \times 10^3}{RT}\right\}}_{\text{③}}$$

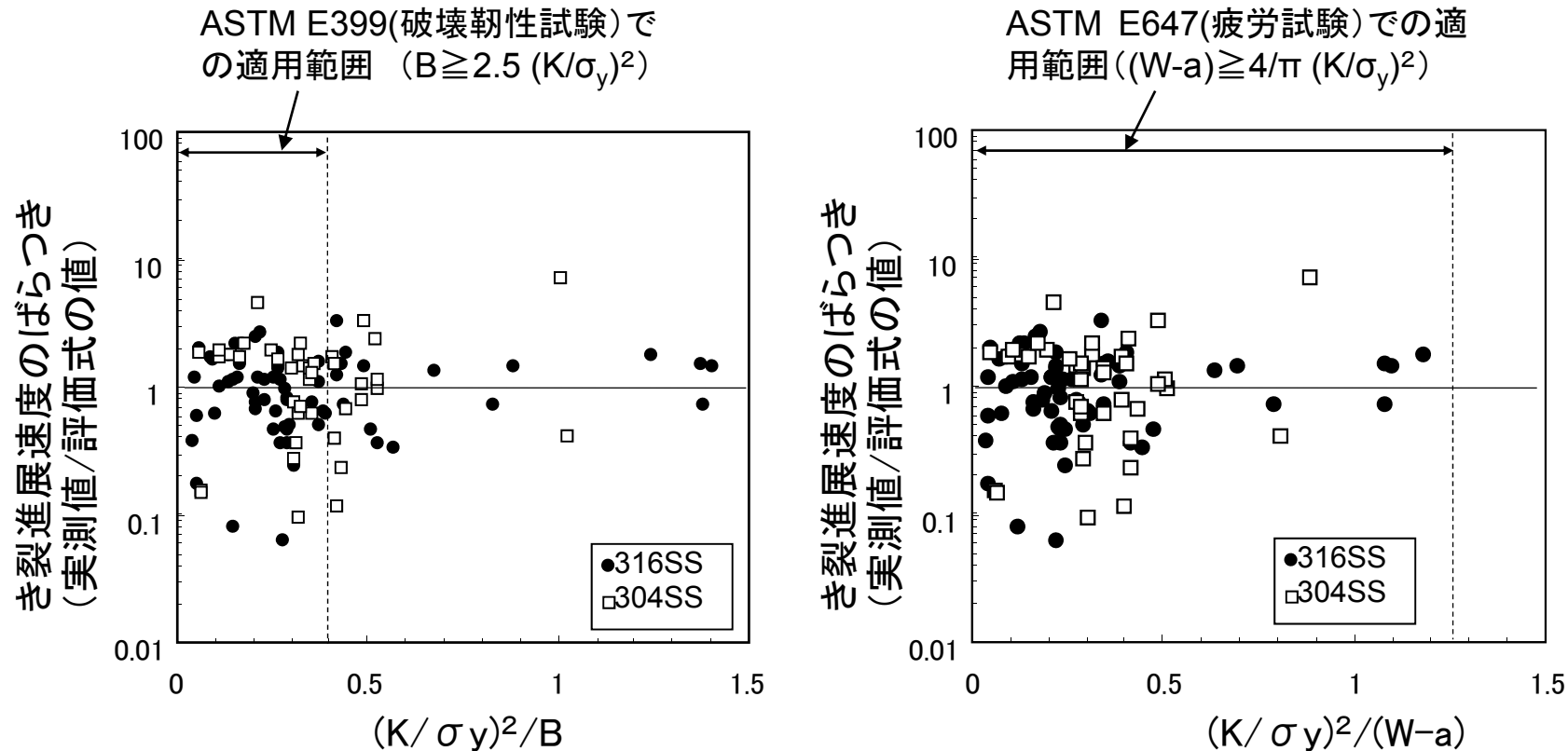
- 計測されたき裂進展速度すべてを用い、①降伏応力、②応力、③温度の関数を多変量解析により求め、評価式を作成。
- 作成した評価式による計算値とき裂進展速度実測値にはばらつきが確認される。



データ群ばらつきの要因は何か？



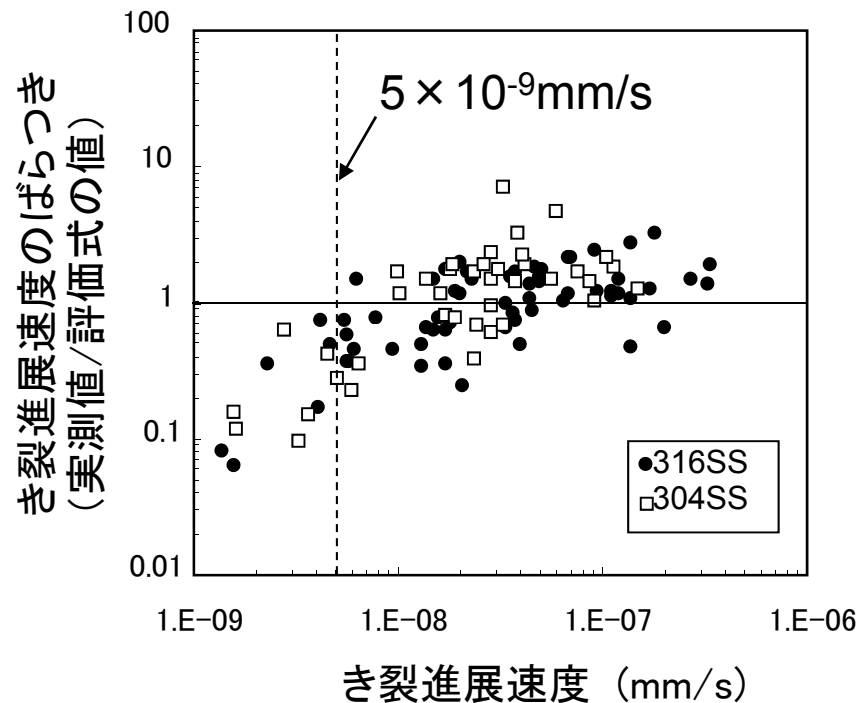
データばらつきの原因考察：試験片の有効性



- 平面ひずみ条件、小規模降伏条件に問題は無かったと考えられる。



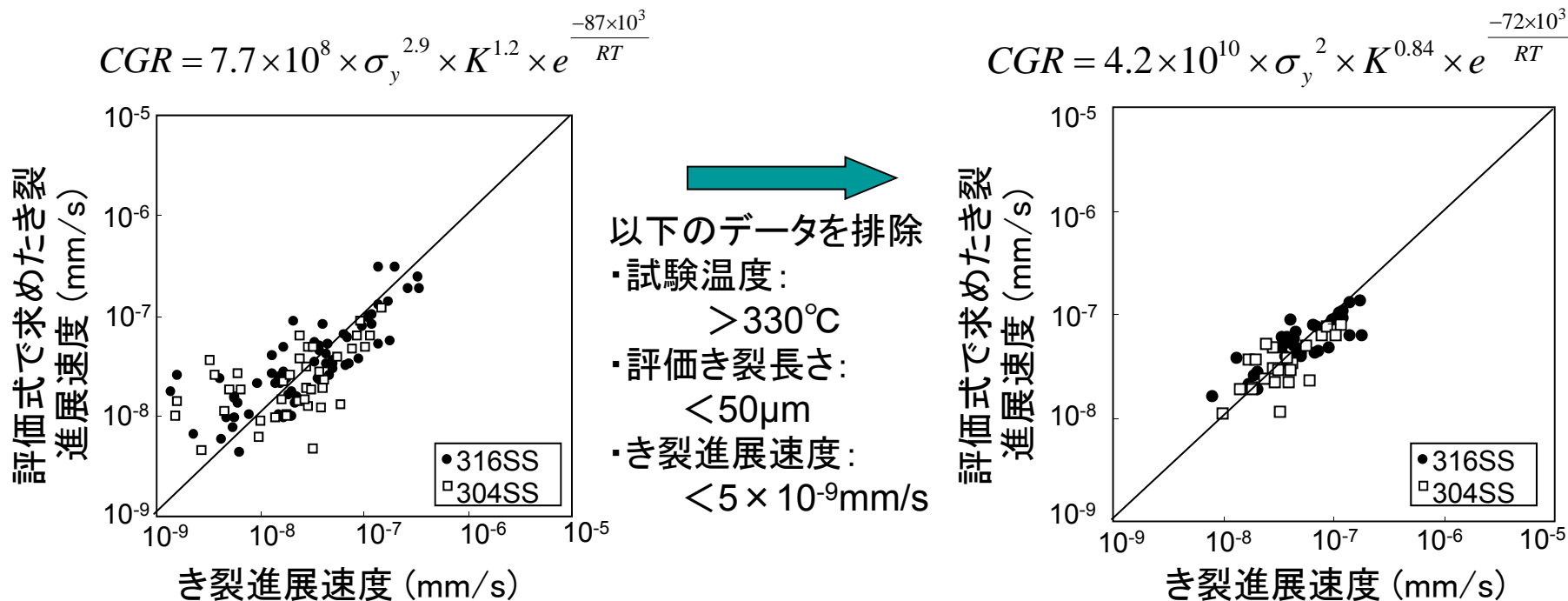
データばらつきの原因考察: き裂進展速度の影響



- き裂進展速度 5×10^{-9} mm/s の実測値は評価値より遅くなる傾向がある。
- 一定速度 (5×10^{-9} mm/s) 以上の進展データは比較的信頼性が高い。



精度の高い評価式の再設定



・評価式の適用性については、再考の余地あり(加工度や応力条件により各パラメータが変化するため、使用するデータ群により最適値が変化する)。ただし、一定の誤差範囲内でき裂進展速度は評価可能。

・SUS316とSUS304は類似のパラメータ依存性を示し、同じ評価式を適用できる。

 まとめ

- PWR1次系模擬環境で、SUS316およびSUS304のき裂進展速度を評価した。
- 体系的なデータ取得を行い、(1)冷間加工、(2)応力、(3)試験温度、(4)加工方位の影響を明らかにした。
- SUS316とSUS304について、類似のパラメータ依存性があり、進展速度に大きな差が無いことを確認した。
- 特定条件下で適用可能なき裂進展速度の評価式(経験式)を作成した。⇒実機保全の優先順位選定や維持規格への反映が期待される。

残された課題:

- ⇒ 評価式の理論的妥当性を確認する取組が必要(メカニズム研究)
- ⇒ 進展のみならず発生の評価を進める。