

**新世代熱間圧延ロール(ハイスロール)  
の開発から学んだこと  
革新的ロールの創生につなげて**

**佐野義一**

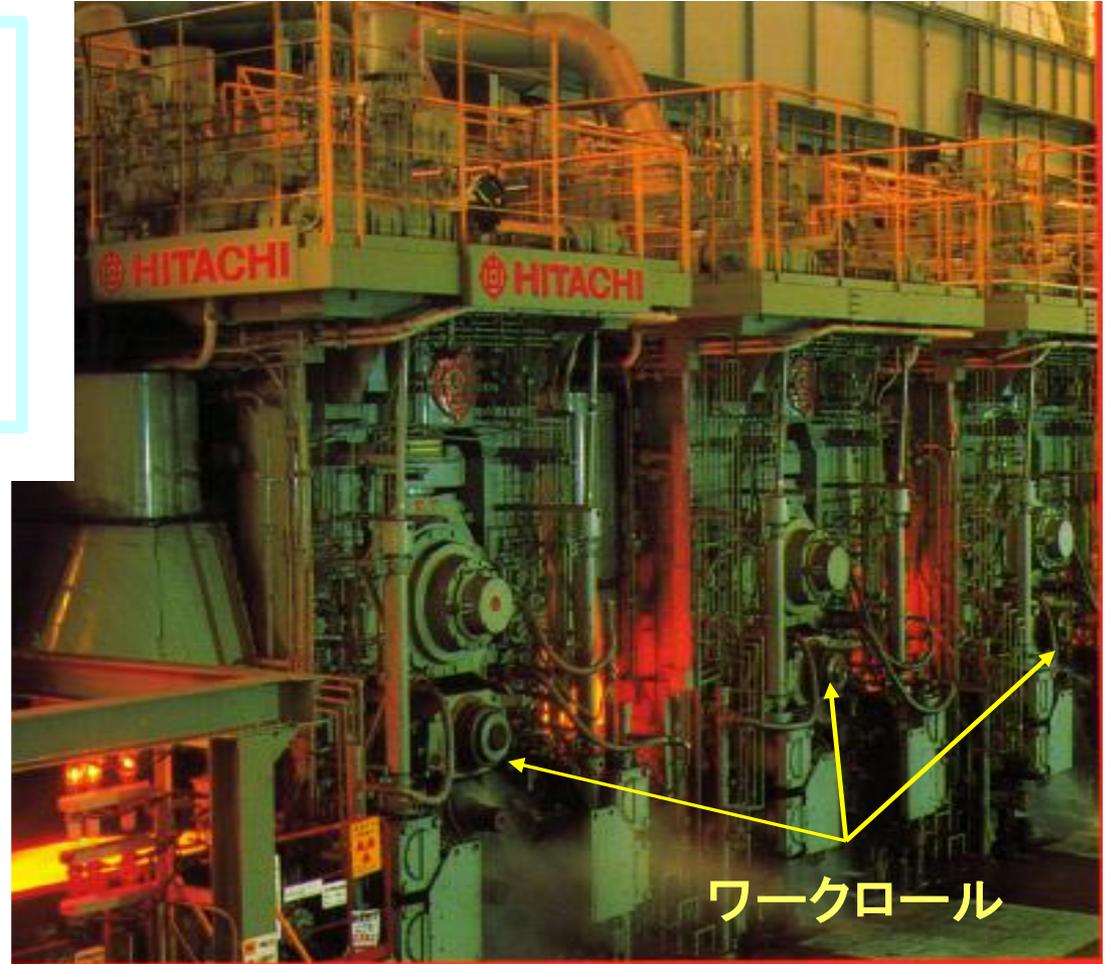
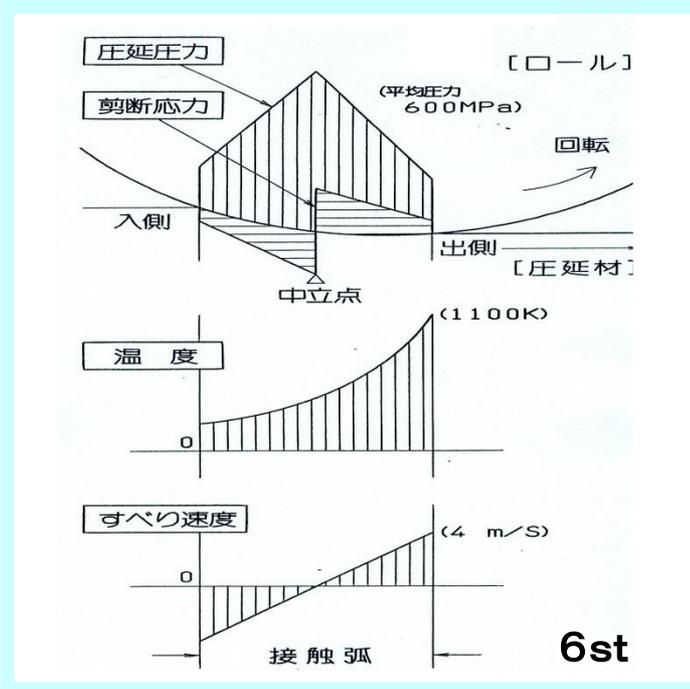
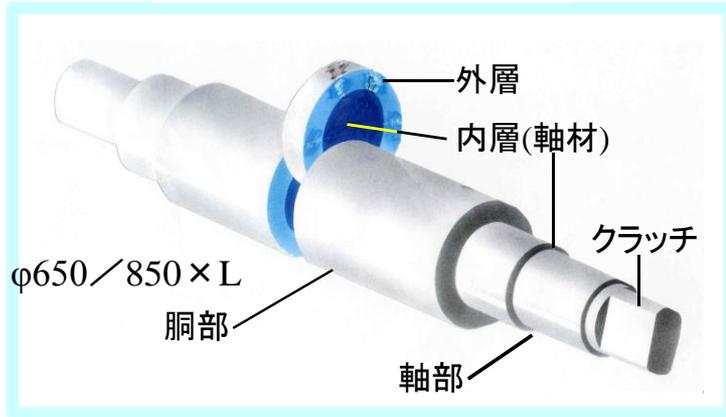
九州工業大学・野田研・研究顧問  
丸栄化工(株) 技術顧問  
(元 日立金属 技師長)

# 内容

1. 開発ハイスロール	3~6
2. ロール材質設計(耐摩耗、耐事故性)	7
3. 耐摩耗性とその評価法	8~15
4. 評価結果	16~19
5. ハイスロールの製造とその圧延成績	20~22
6. 耐事故性とその評価法	23~28
7. 評価結果	29
8. ロール事故によるロール損傷の低減技術	30
9. ロール材質設計の基本概念的修正	31~33
10. 開発から学んだこと	34

# 熱間薄板圧延機とロール(ホットストリップミル)

## 複合中実ワークロール

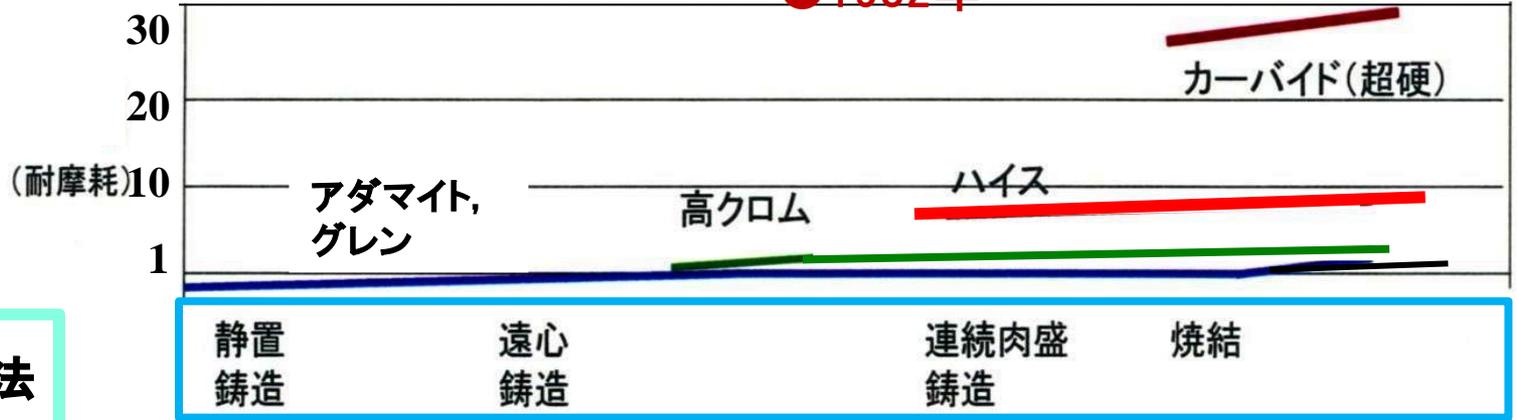


# 板ロール材の変遷

HCミル八幡に導入 (日立・梶原博士)

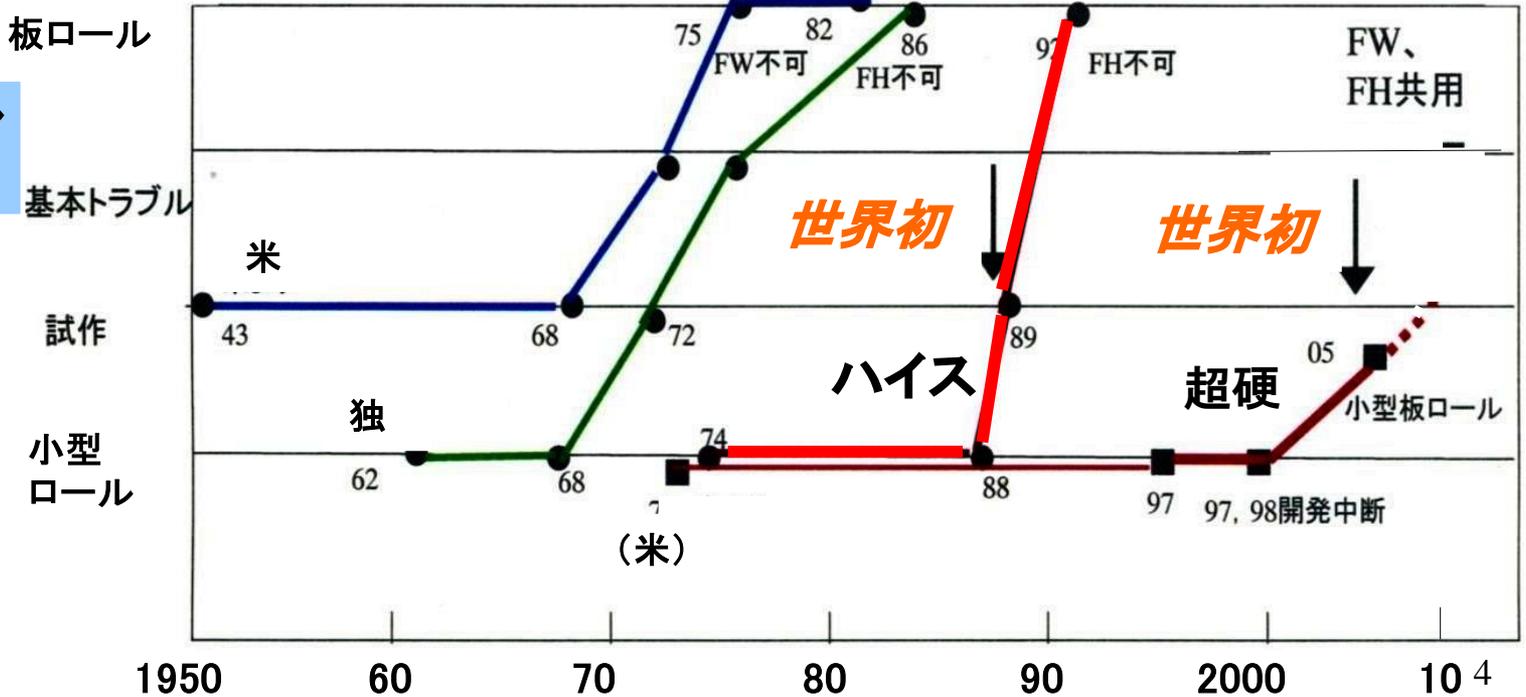
●1982年

性能



鑄造法

板ロール  
完成度



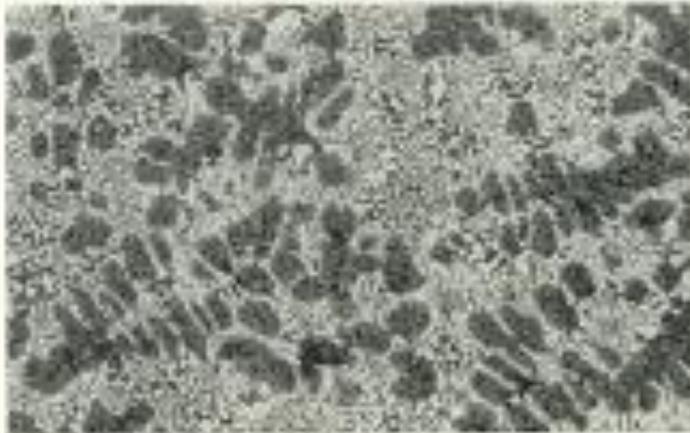
# 板ロールのマイクロ組織



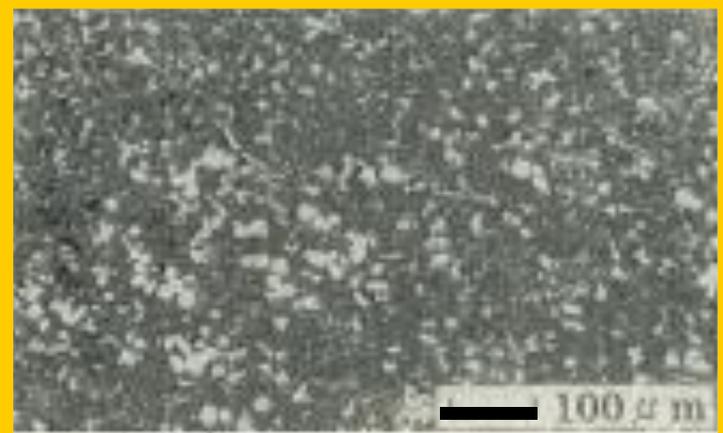
アダマイト(C1.7%)



グレン



高クロム鋳鉄



ハイス

# ロール開発の合理的な開発手順(具体例)

重要

性能目標	開発目標(耐摩耗性2倍、耐事故性等) 目標達成の考え方
材質設計	同上の方法
	実験室資料,耐摩耗,耐事故評価
試作	小型ロール試作・評価 実体ロール試作・評価
	製品ロール製造
品質保証	品質保証
評価	使用結果・評価 目標未達再開発

## 従来法



## 新方式



# 熱延ロール開発の基本概念

グレンロール

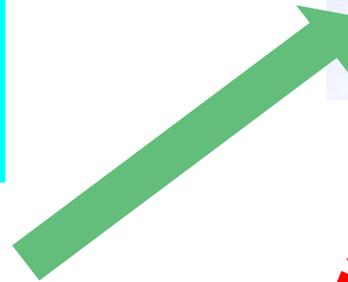


## 耐摩耗性

- ・硬さ(常温, 高温)硬さ
- ・炭化物
- ・合金

## 耐事故性

- ・硬さ
- ・黒鉛
- ・炭化物
- ・靱性



矛盾

本質解明

評価(定量化)

材質設計

製造・品質保証

# 熱延ロールの表面損傷(グレン 摩耗、肌荒れ)

肌観察:微研摩, F5



Rotation

(a)ラッピング仕上

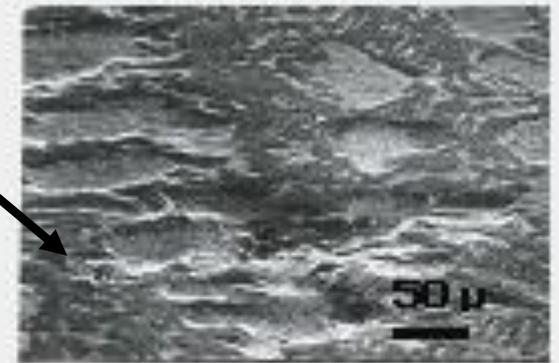


50 μm

(b)(a)を腐食

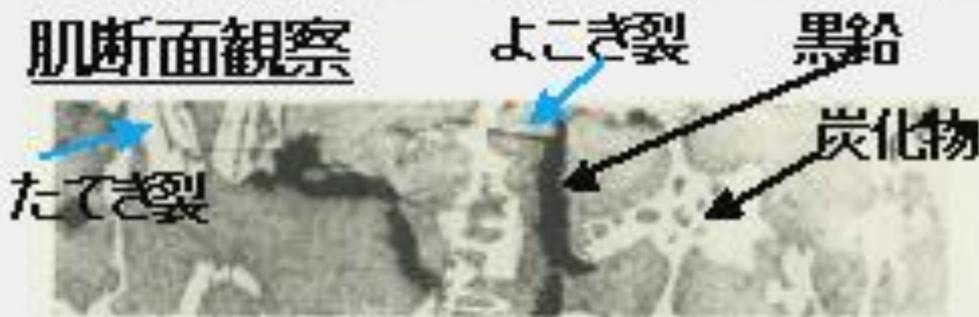
F5肌荒れ除去後のミクロ観察:10~20 μm研

肌SEM観察, F7



F7ロール肌

肌断面観察



Rotation

50 μm

F5ロール肌円周断面の観察

炭化物: 摩耗小 き裂  
 硬さ: 摩耗小  
 黒鉛: 摩耗大 き裂  
 微細化: 摩耗小

# 耐摩耗に優れたロールを目指すには

ロール摩耗要因の定量的把握

圧延実績に基く(~80年代)



グレン

炭化物量・硬さ

(マイナス効果:脆い)

硬さ・高温硬さ(脆い)

黒鉛 (切欠き)

微細化 (脆い)

影響因子  
の定量化

最適化

実圧延機でのテスト

シミュレータの活用

改良可(従来法)

飛躍不可(リスク小)

高精度シミュレーター  
の開発

# 損傷シミュレーション(評価法)の要件

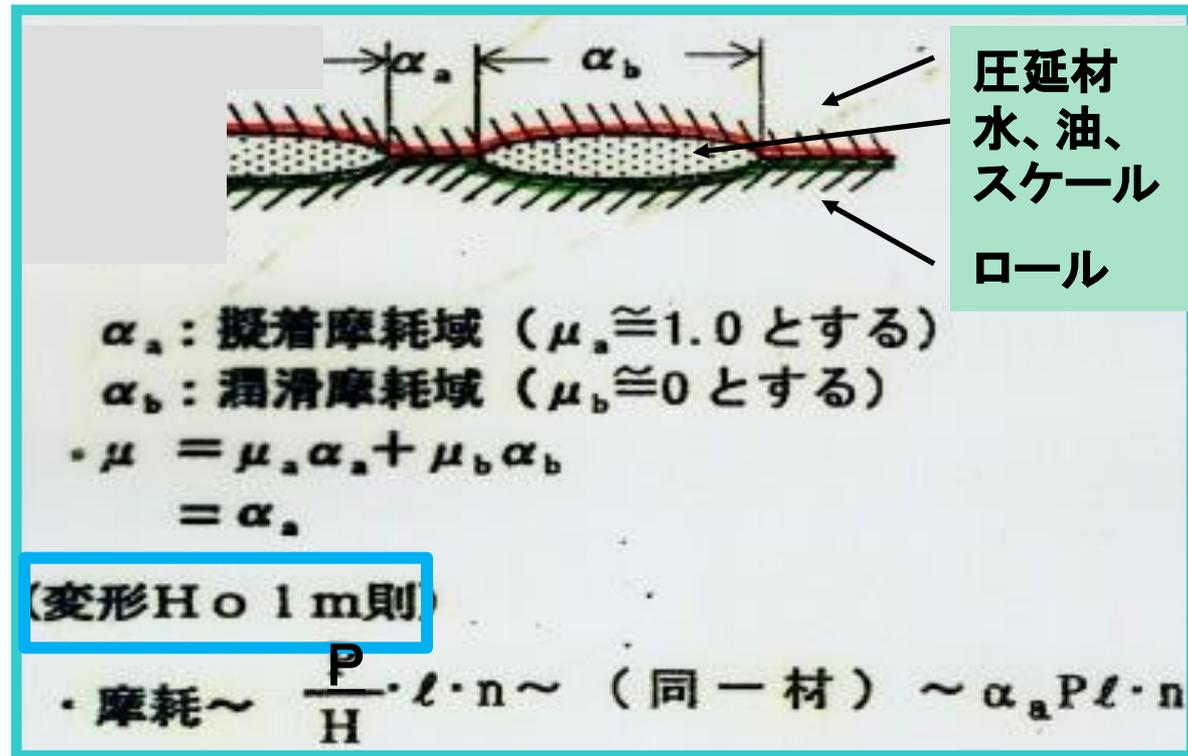
1. 実態での優劣順位の再現性
2. 損傷形態の近似性(損傷メカニズムの近似性)
3. 試験条件の近似化

	構造材	ルール		重要性 の評価
損傷	疲労強度	絞りき裂	熱き裂	
評価法	引張試験	破壊靱性試験	熱衝撃試験	
①順位	○	△	×	○
②形態	×	△	△	○
③条件	×	×	△	△
総合	△	△	×	

# ロールギャップの潤滑，摩耗(平野教授，川並博士)

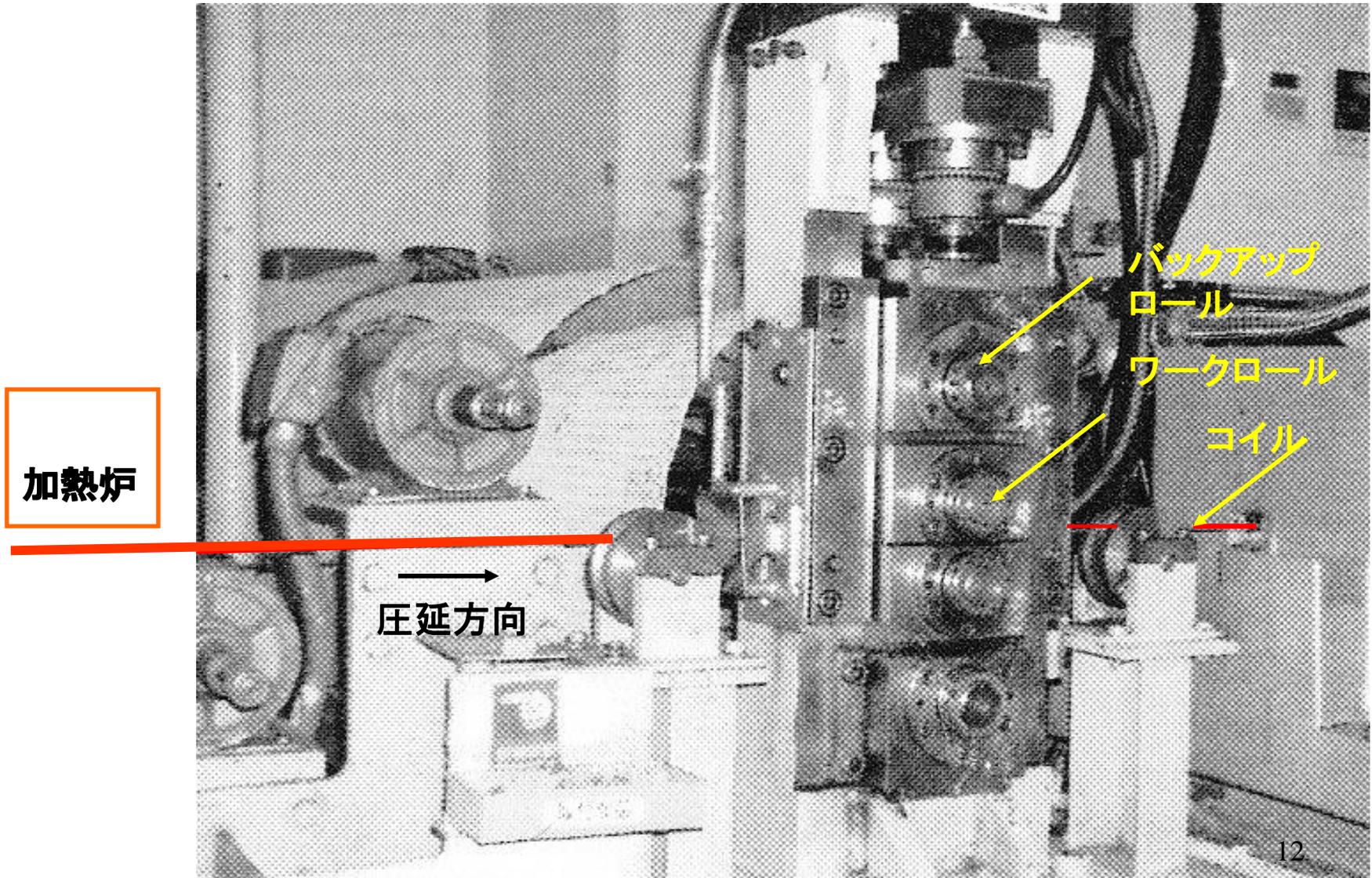
仮定：凝着摩耗モデル

摩耗  $\sim$  凝着摩耗 + 潤滑摩耗  
+ (引掻き、浸食、熱疲労、...)



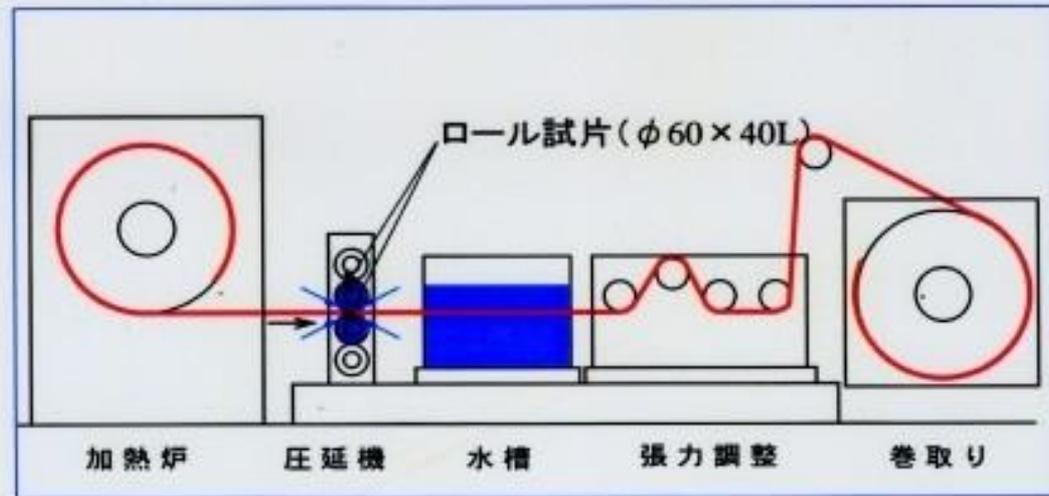
➡ **摩耗  $\sim \mu P l \cdot n$**

# 圧延摩耗試験機の外観(木原教授)



# 圧延摩耗 シミュレータ

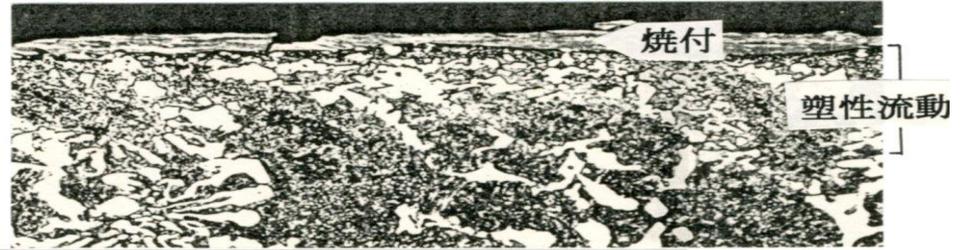
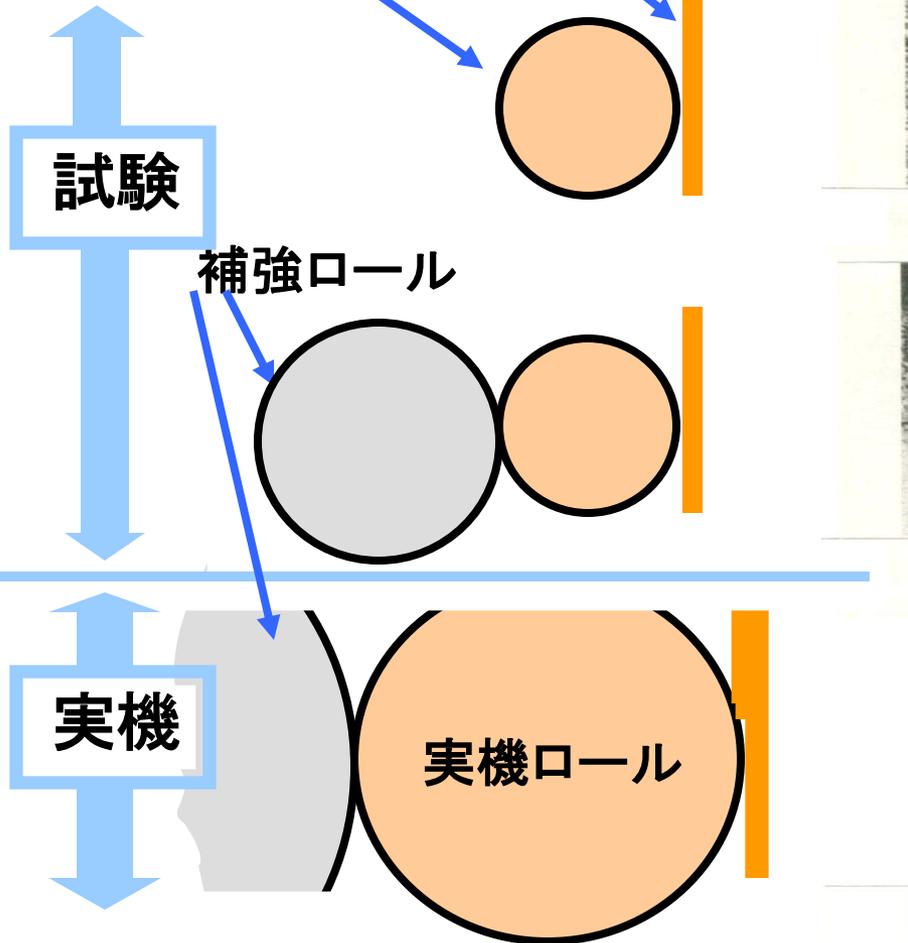
(昭和シェル  
石油, 大同  
化学工業)



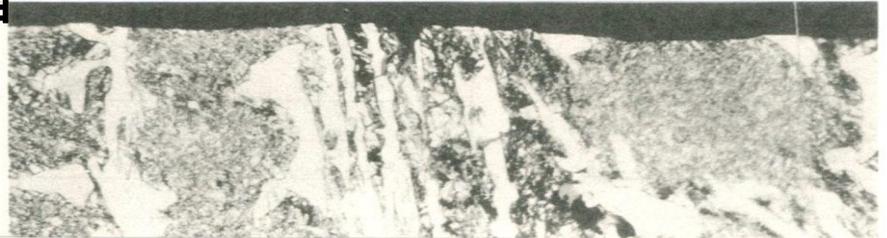
## 試験条件

圧延圧力	60~65kg/mm <sup>2</sup>
圧延温度	900±5°C
圧延速度	150m/min
圧下率	25~30%
冷却水	ロール入側: 0.4L/min ロール出側: 4.0L/min
圧延材	材 質: SUS304 寸法 (mm): (厚み1.0) × (幅15.0) × (長さ 2.0 × 10 <sup>5</sup> )

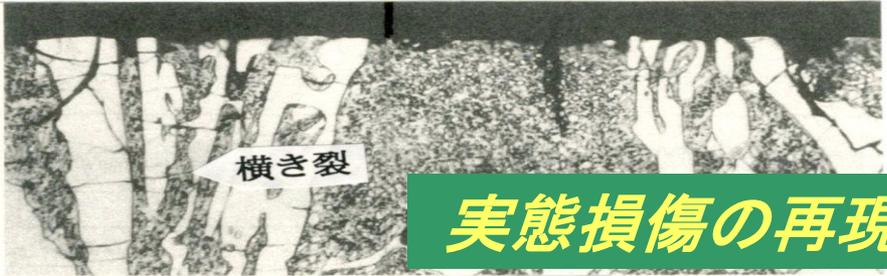
# シミ圧延摩 耗ユレー シヨンの 比較



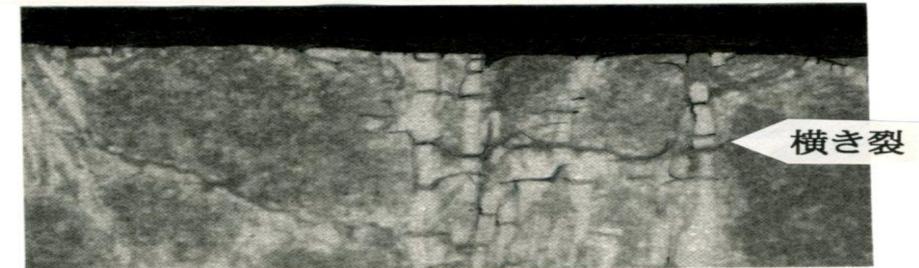
高温 2 円筒式試験 (ステンレス)



2 重式圧延摩耗試験 (普通鋼)



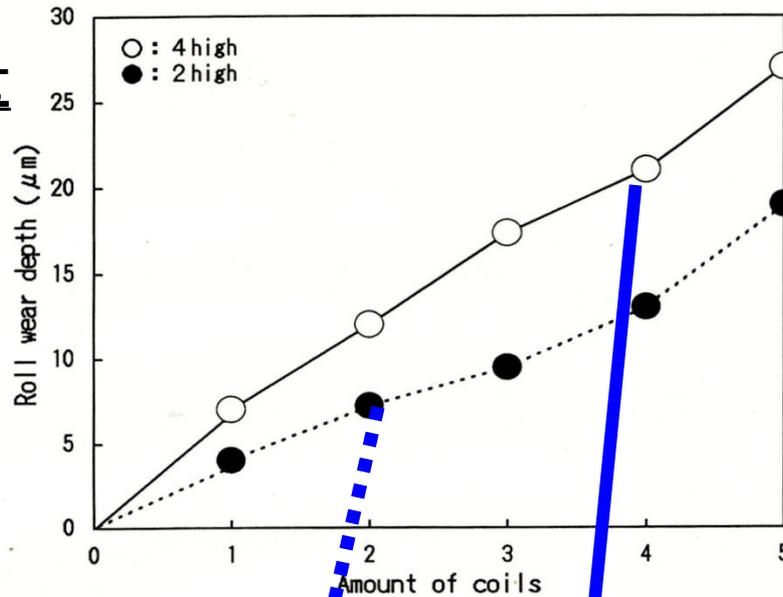
4 重式圧延摩耗試験 (普通鋼) 20 μm



4 重式実圧延機 (普通鋼)

# 摩耗・損傷形態への4重化による影響(合金グレン)

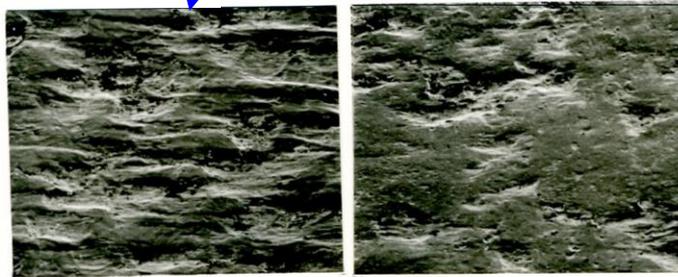
## 摩耗量



2重式

4重式

## 表面形態

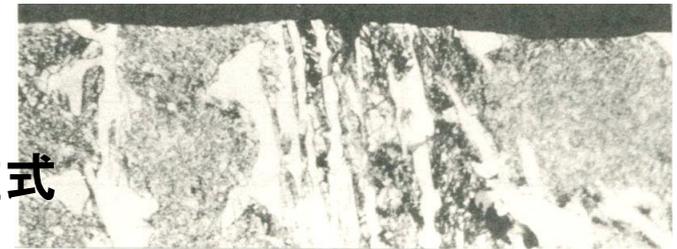


(a) 2重式圧延

(b) 4重式圧延

100 μm

## 内部損傷形態



2重式



4重式

横き裂

20 μm

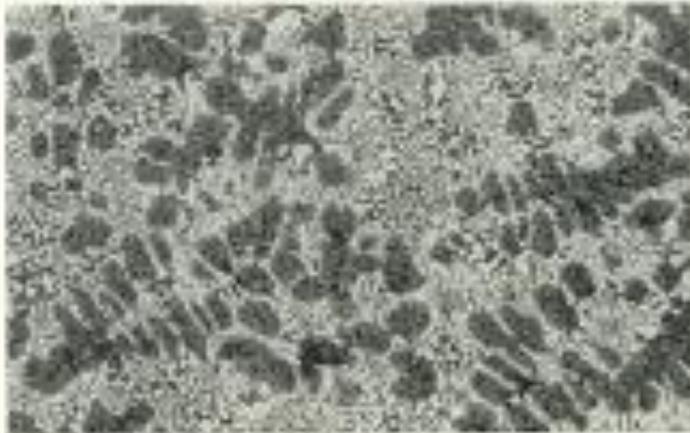
# 板ロールのマイクロ組織



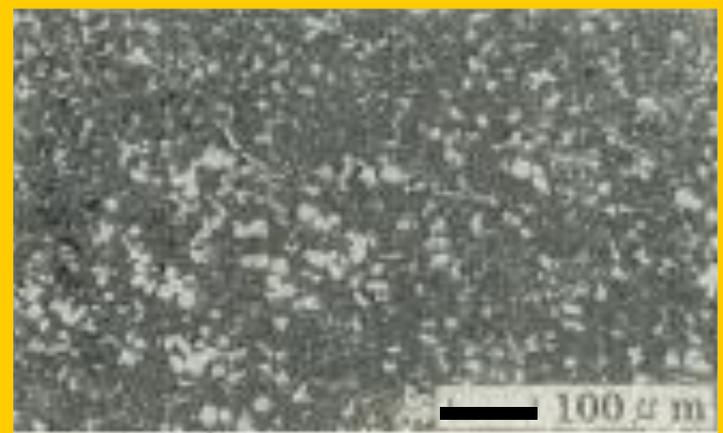
アダマイト(C1.7%)



グレン



高クロム鋳鉄



ハイス

# 各種ロール材の特性要因と摩耗 →ハイス優位性の裏付け

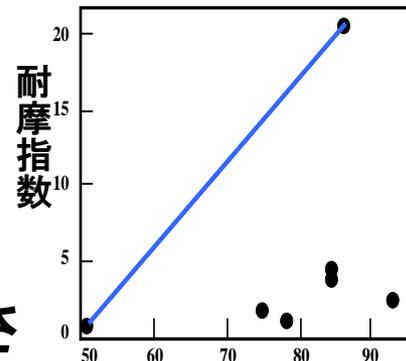
項目	耐摩指数	引張強さ	硬 さ			炭化物		高温硬さ 600C	炭化物硬さ・強さ
			MPa	Hs	合成Hv	基地Hv	硬さHv		
グレン	1.0	450	78	635	490	900	35	120	1.4
アダマイト	0.8	600	50	385	350	900	6	80	0.3
高クロム鑄鉄	1.5	700	75	725	500	1400	25	200	2.5
ハイス	4.0	1100	85	1100	680	2800	20	380	6.2
ハイス (粉末)	4.5	1400	85	1000	680	2800	15	380	5.9
ハイス (工具)	2.5	2000	93	1100	800	2800	2	450	1.1
超硬	20	1900	88	2050	300	2800	70	80	39.4
サイアロン	5.0	400	1500Hk	1500Hk	—	1500Hk	100	—	6.0

耐摩耗順位の再現

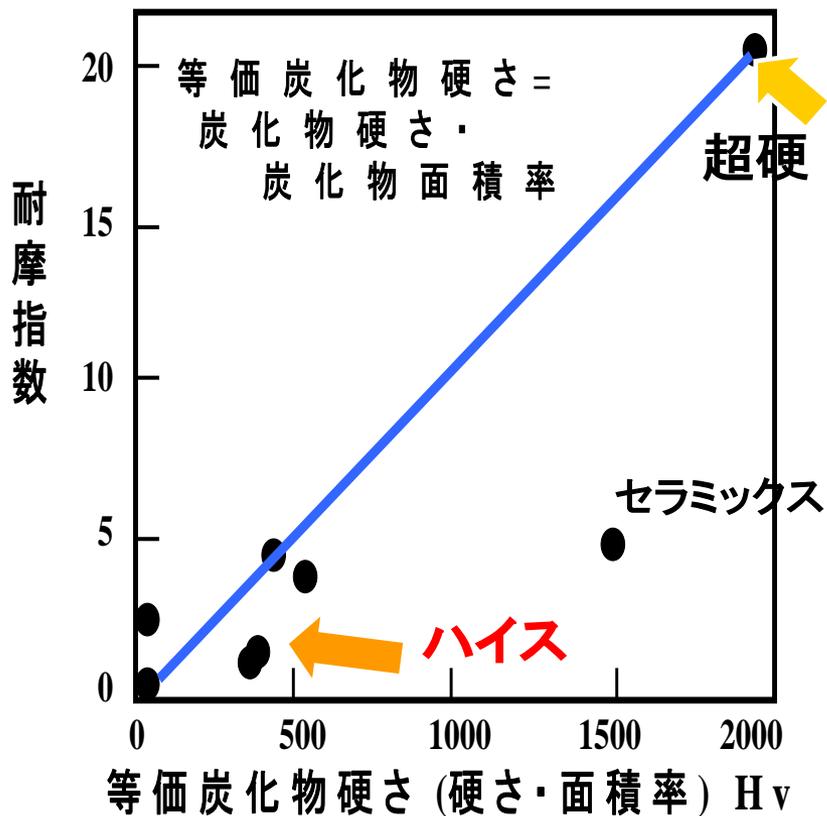
新材質開発の予見

- ①熱間圧延摩耗試験機 ②炭化物高温硬さ: 常温硬さに同じ  
③等価炭化物硬さ・引張強さ

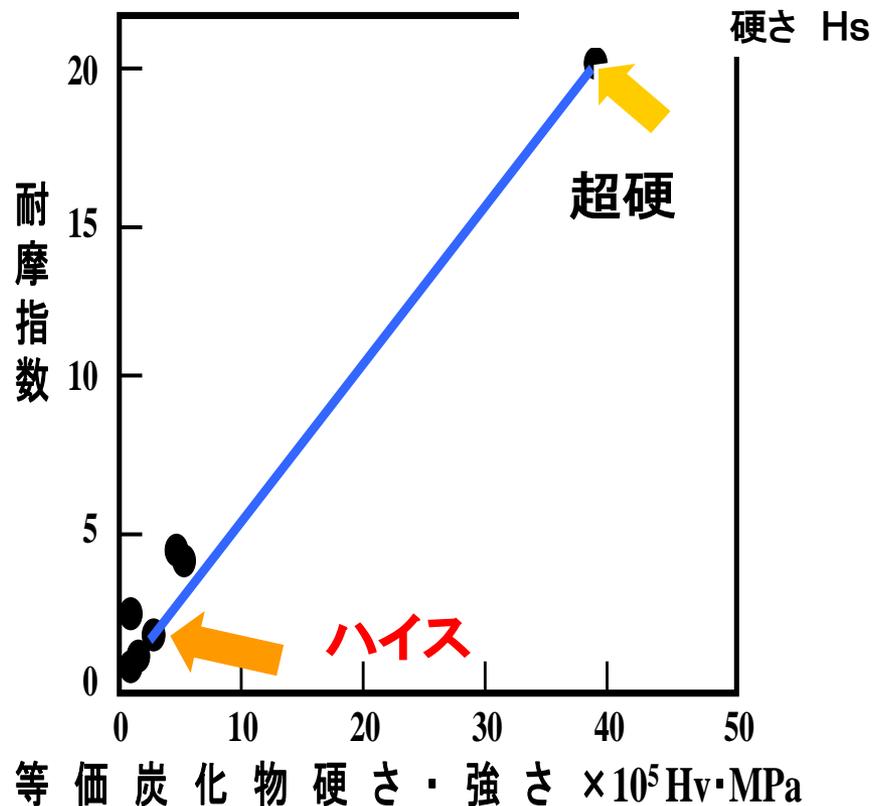
# 摩耗と炭化物硬さ,炭化物・強さ



## 等価炭化物硬さ

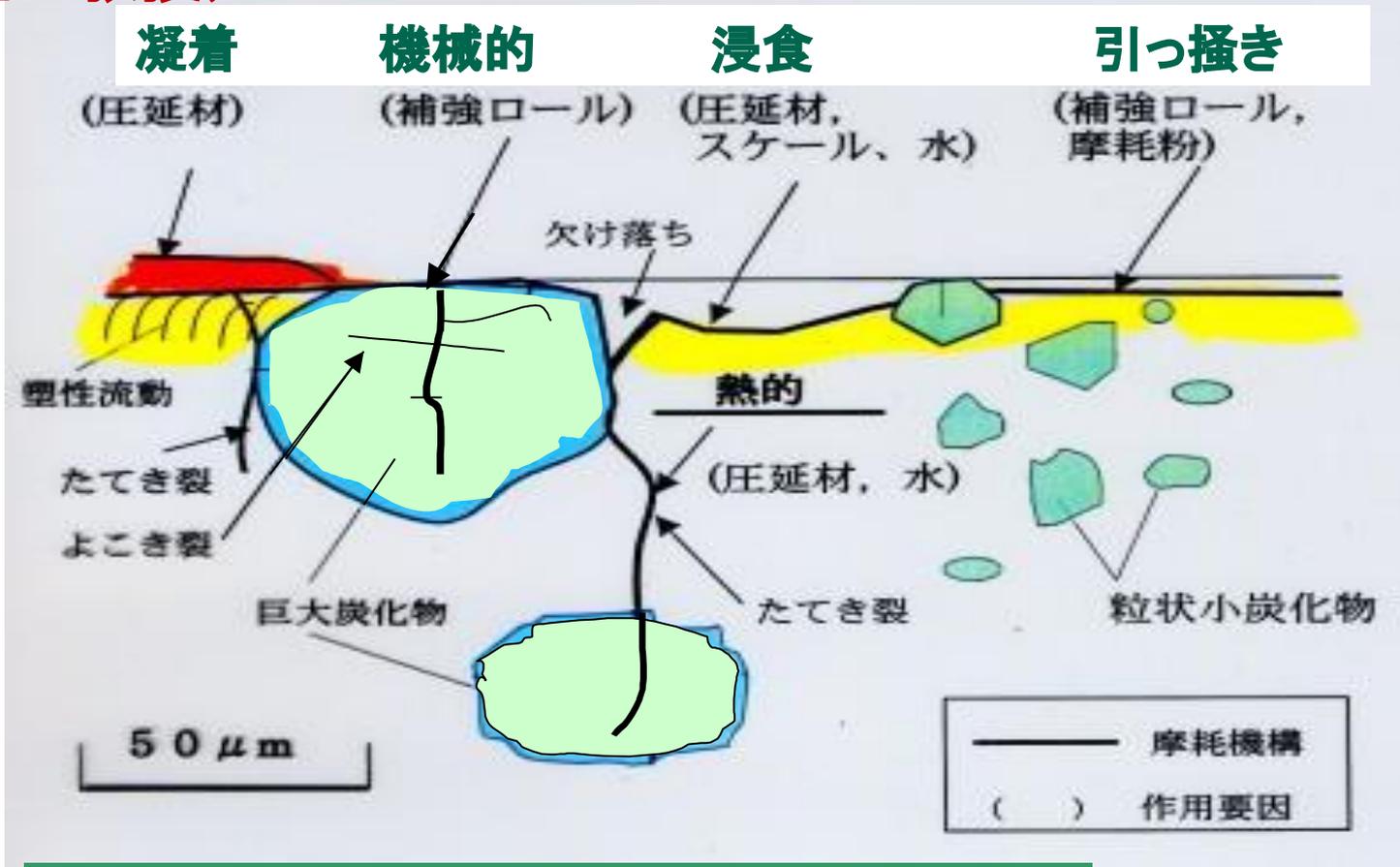


## 等価炭化物硬さ・強さ



# ロールの表面損耗機構と摩耗則

(笹田教授)

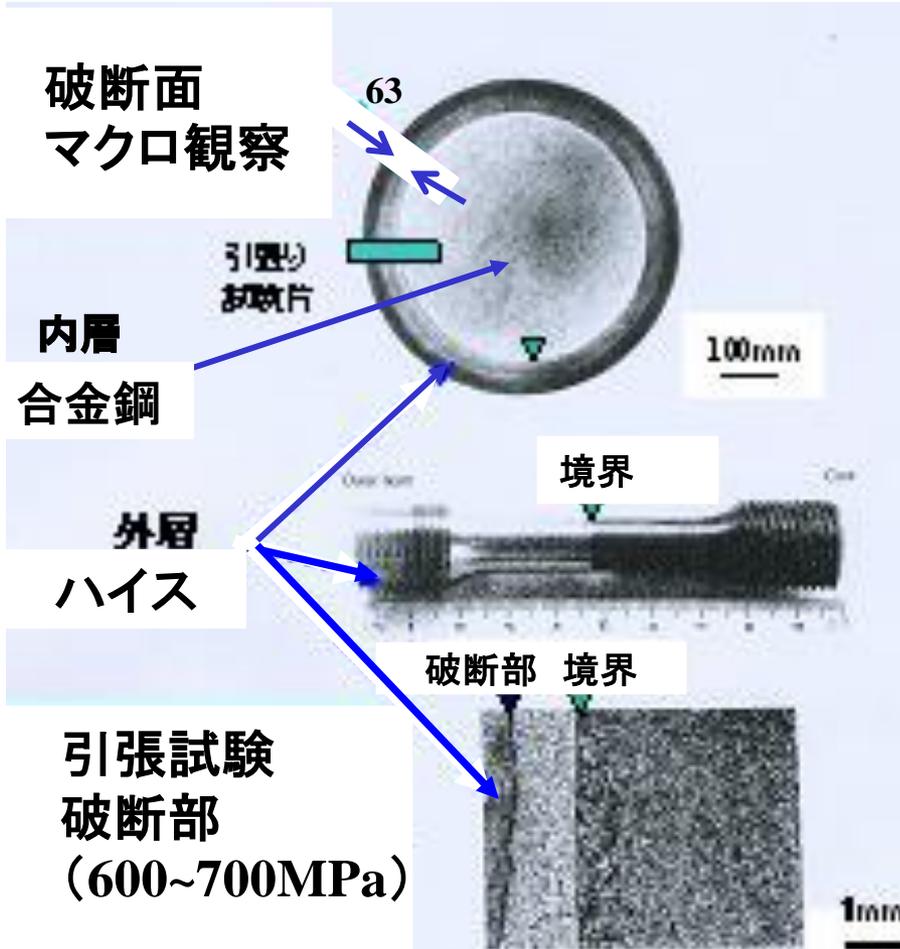


ロール摩耗実験式:

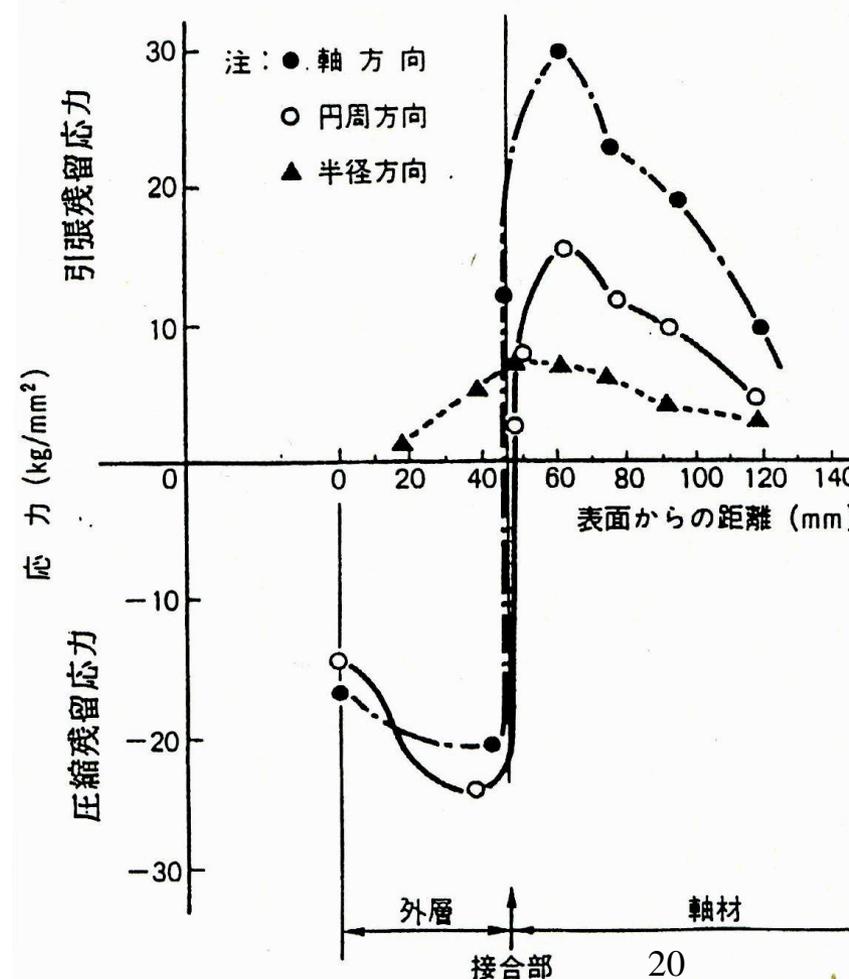
$$\Delta W \sim C_d \cdot H_c \cdot \sigma \cdot b$$

# ハイスロールの出来栄え(CCC法) (580φ × 1440)

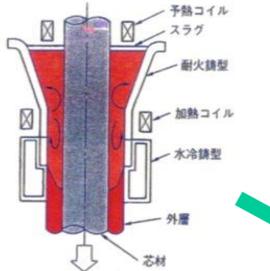
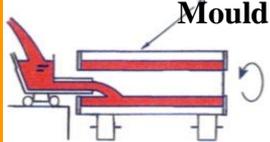
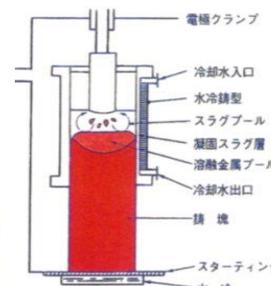
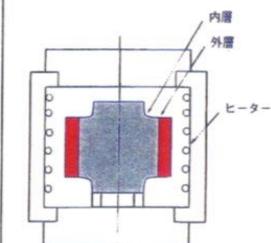
## 境界層とその強さ



## 残留応力分布

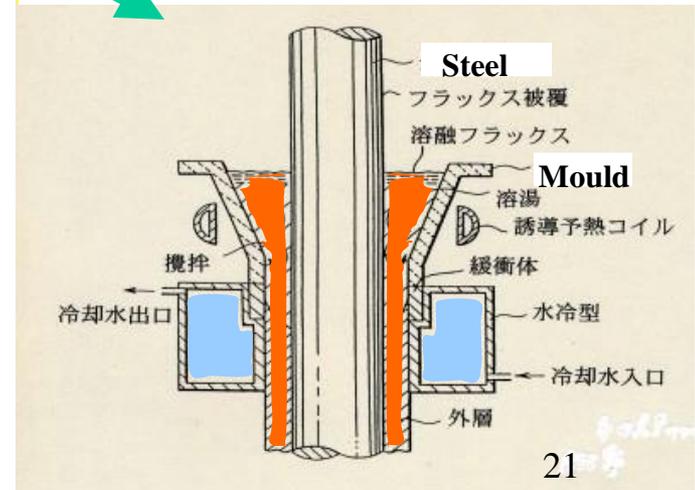


# 複合ロールの代表的な製造法(日研・児玉博士 日立・梶原博士)

	HSS CCC	(HSS) CC	ESR	PS
Idea of production				
High alloy	○	△~○ (合金炭化物が偏析)	○	◎
Fine grain	○~◎	△		
Shaft strength	◎	△		
Plant investment	△	○		
Cost	○	○		
Summation	◎ (強靱な芯材に 高合金材の肉盛可能)	△ (高合金化に限界 芯材の強靱化に限界)		(組織)

CC:  
Centrif-  
ugal  
Casting

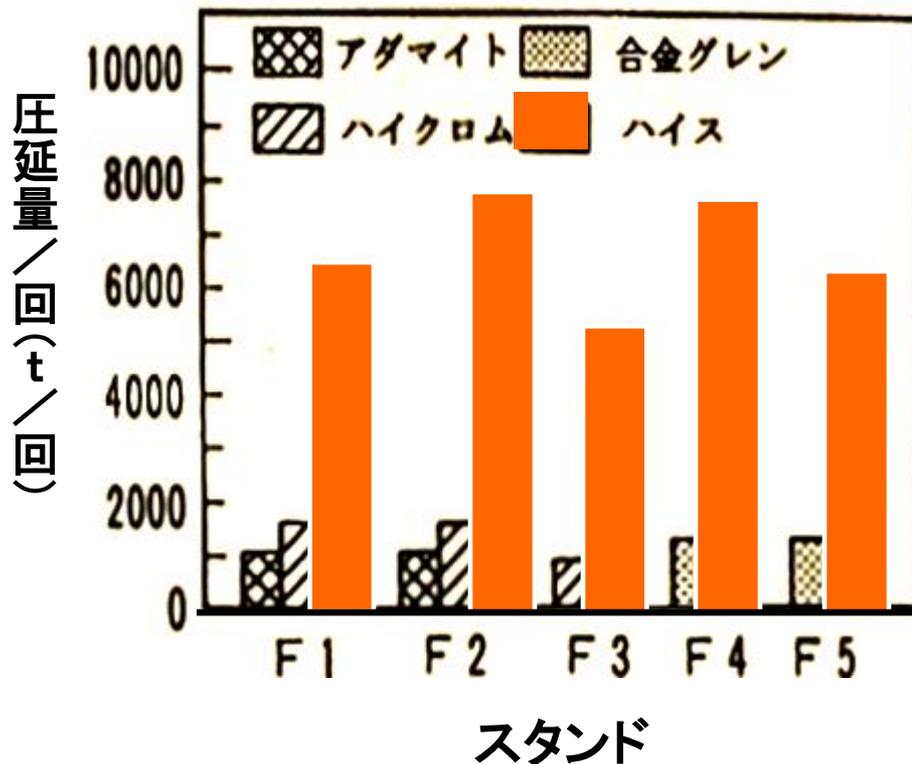
CCC:  
Continu-  
ous  
Casting  
for Cladd-  
ing



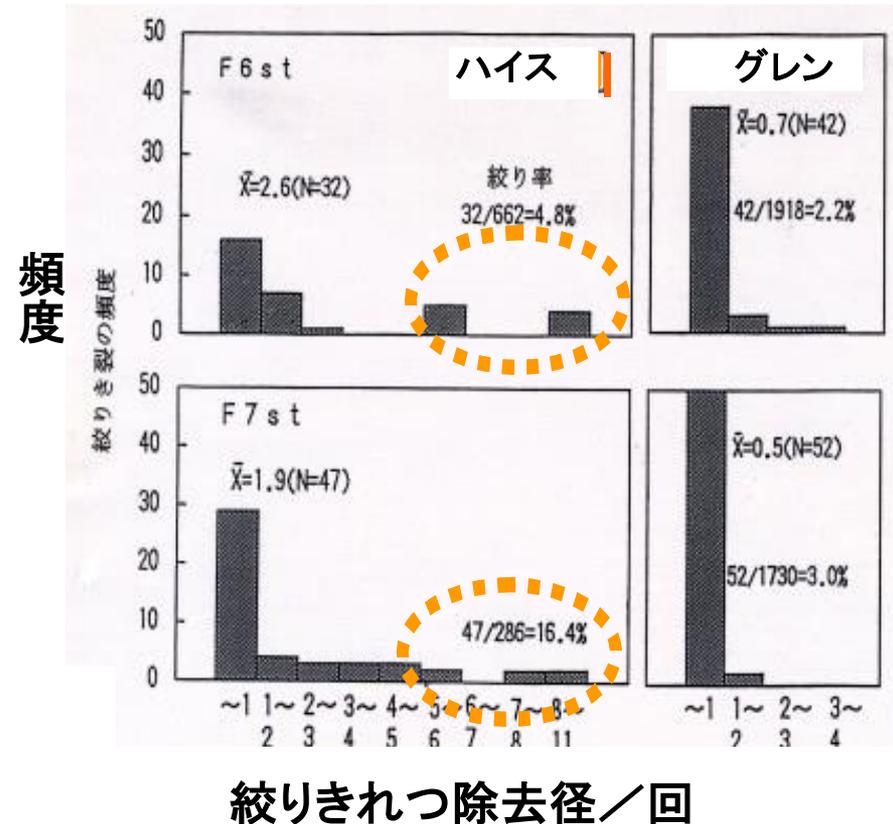
# ハイスロールの使用成績

耐摩耗・肌荒れ性に勝れるが、**絞り事故に弱い**

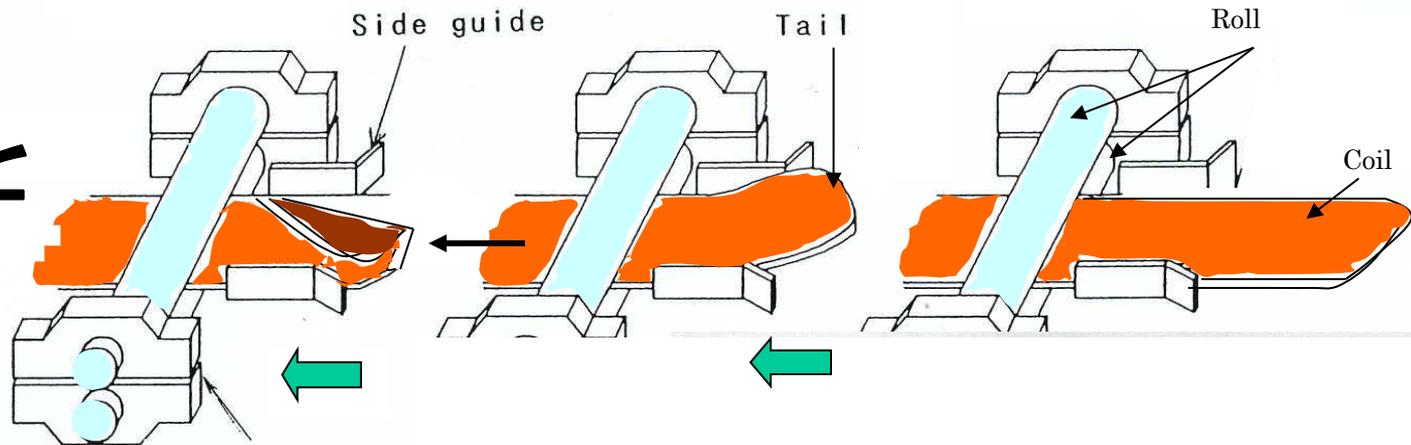
ハイスの圧延成績  
(事故消耗を除く)



絞りによるき裂深さの比較



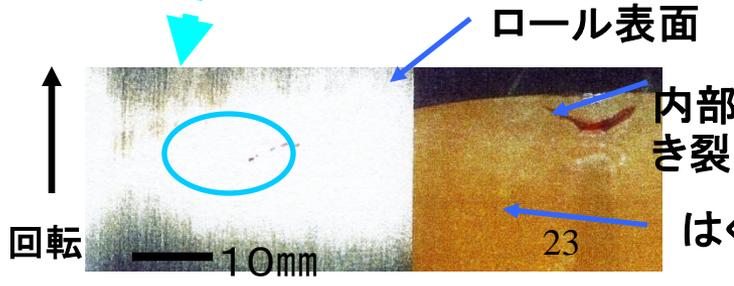
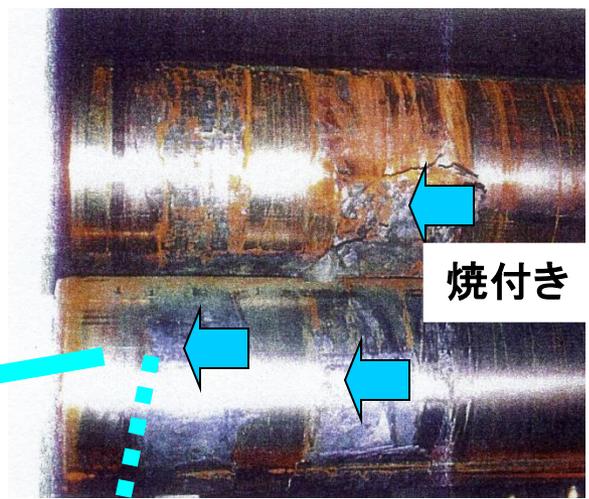
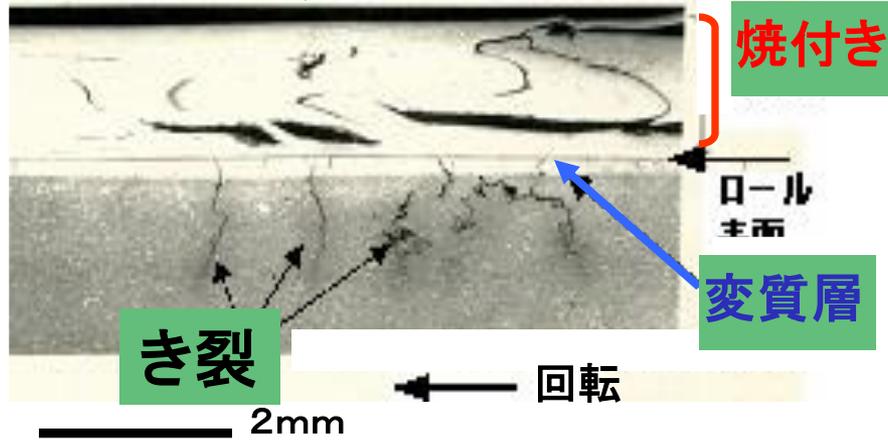
# 絞り込み プロセスと き裂発生



## 焼付直下損傷の実証 (世界初)

--焼付き 変質層 き裂--

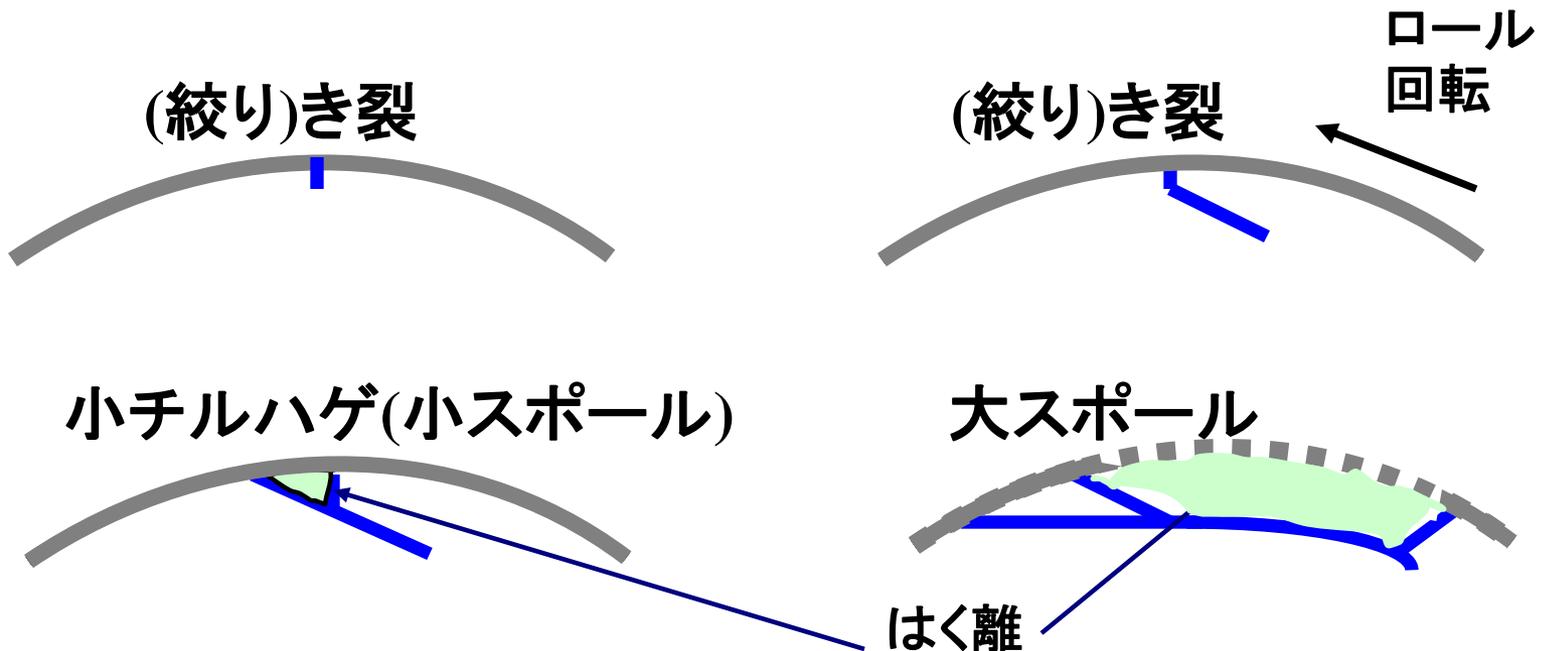
### 焼付き断面観察



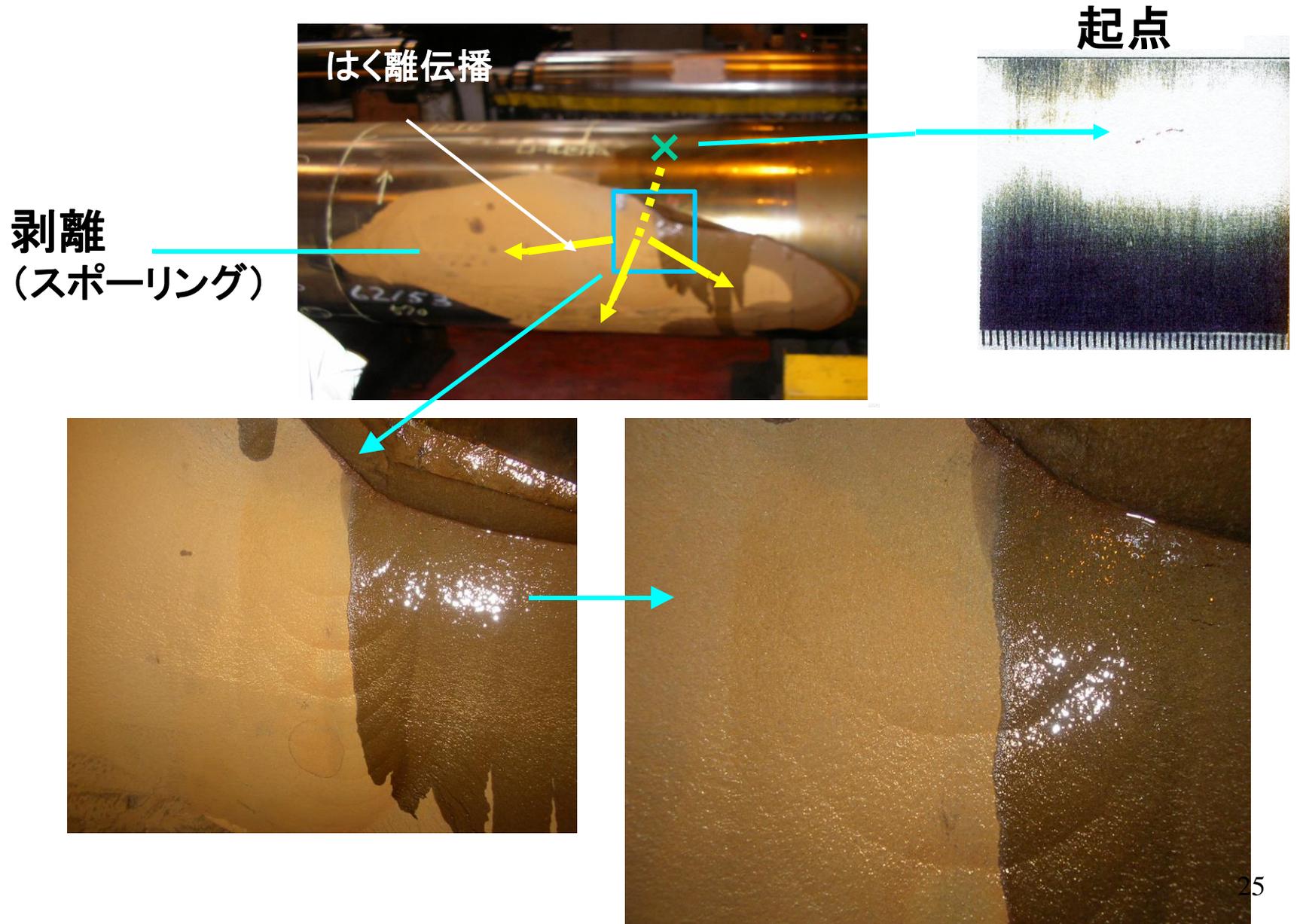
# 耐絞りき裂性(耐事故性)

(西谷教授,  
村上教授)

- 絞りに起因するき裂の発生、深さに対する抵抗
- 耐事故性, 耐き裂性, 耐チルハゲ性などとも呼称
- 疵の発見時点で、損傷形態が異なる



# 大スポーリング事故の状況

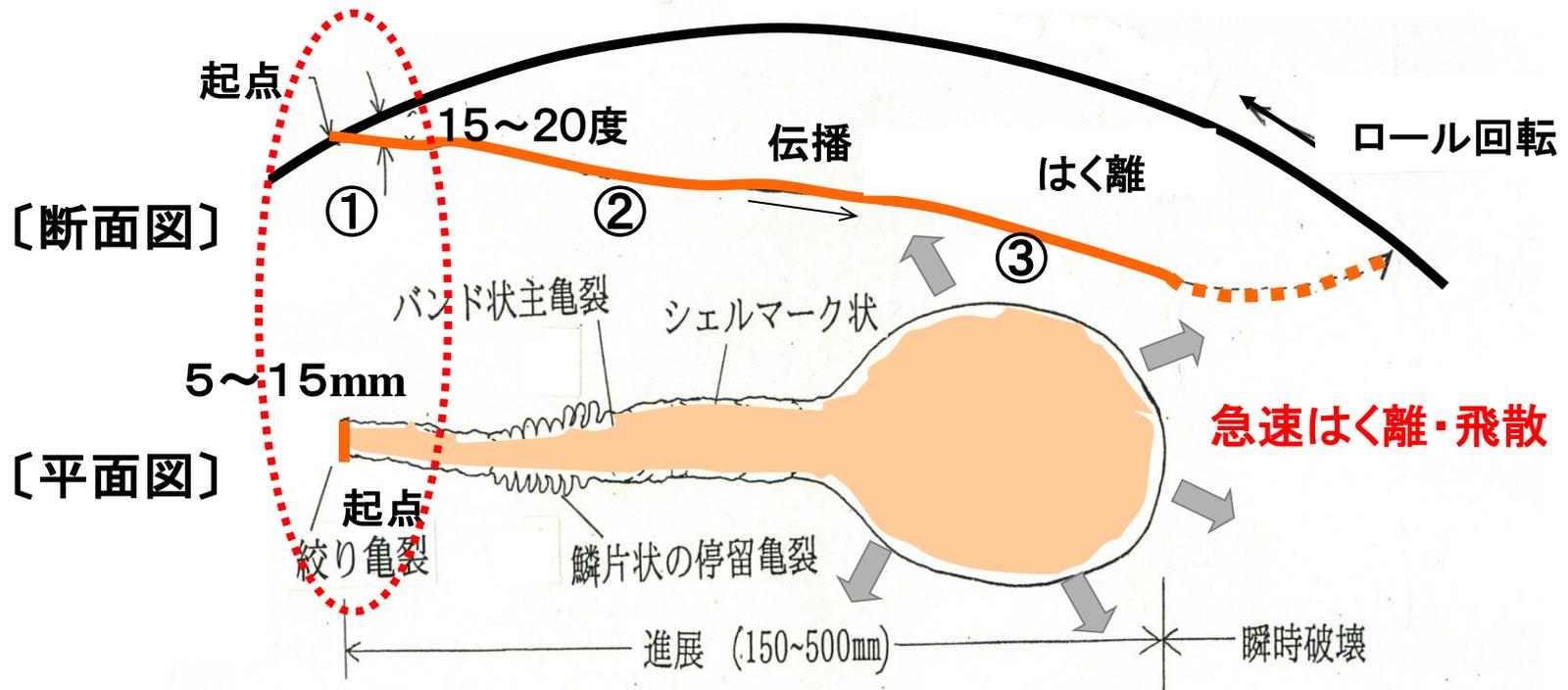


# スポーリングの進展モデル

## 破面観察

← ロール回転

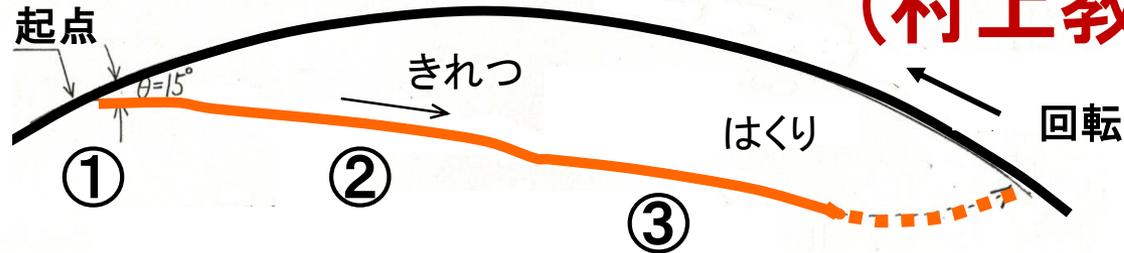
起点



[き裂の  
区分]

- ① 絞りき裂の発生 (起点)
- ② 伝播
- ③ はく離

# 大スポールとロール材質特性の関連、課題 (村上教授)



過程	これまでの評価			ロールの対策
	材質特性	ハイス、グレン対比	評価適否	
① 絞り き裂の 発生	靱性 *	ハイス=グレン	×	評価法の 開発
	強さ	ハイス>グレン	×	
② 伝播	速さ	ハイス=グレン	×	メカニズム
	残留応力	最適範囲	△	適切な範囲
③ はくり	靱性	ハイス=グレン	×	適切範囲
	残留応力	最適範囲	△	

根本  
対策

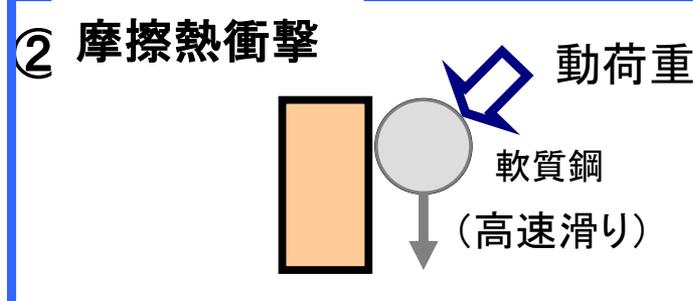
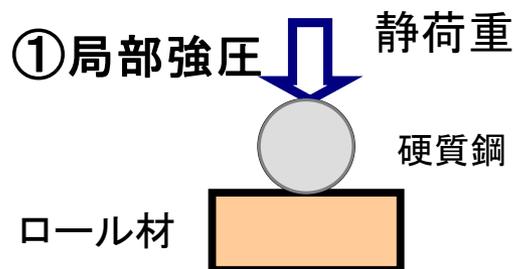
暫定  
対策

\* 破壊靱性値 KIC: 同一材質では評価(○)

# 耐絞りき裂性(耐事故性)評価法の比較

新たに開発

評価法	グレン	高クロム鑄鉄	ハイス	評価精度
実機評価	○	×	△	—
引張強さ (転動疲労)	×	△	○	×
破壊靱性	△	△	△	×
熱衝撃	×	△	○	×
局部強圧①	×	△	○	×
摩擦熱衝撃②	○	×	△	○

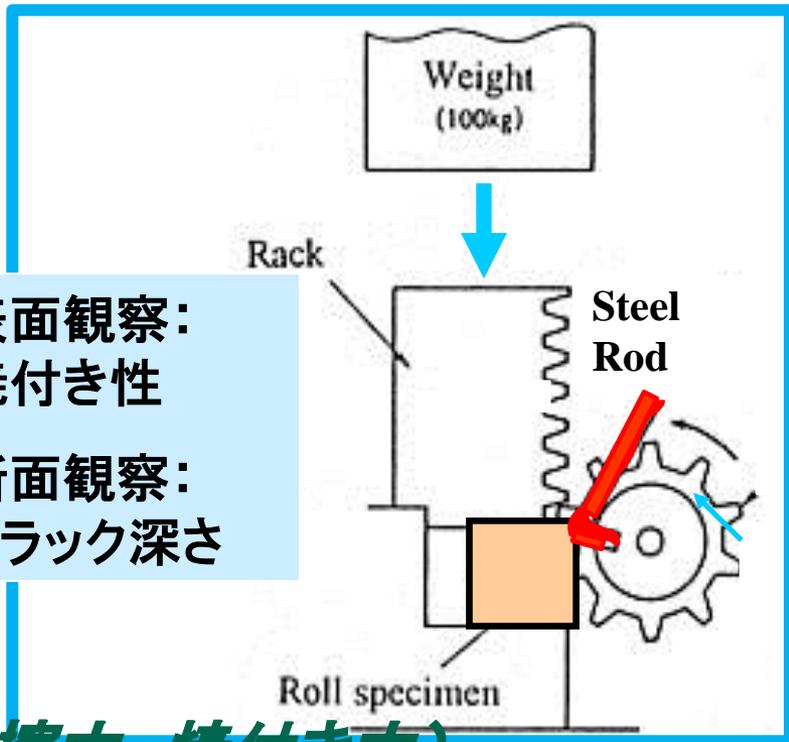


# 摩擦熱衝撃試験と評価(日本製鋼所)

実体損傷  
の再現

## 試験結果の比較

### 試験の原理



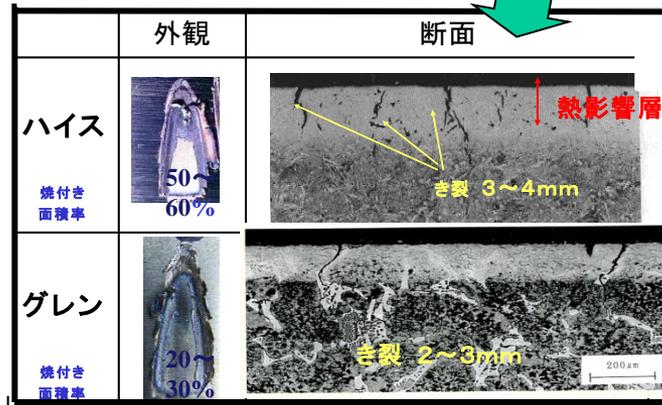
表面観察:  
焼付き性

断面観察:  
クラック深さ

(摩擦大、焼付き大)

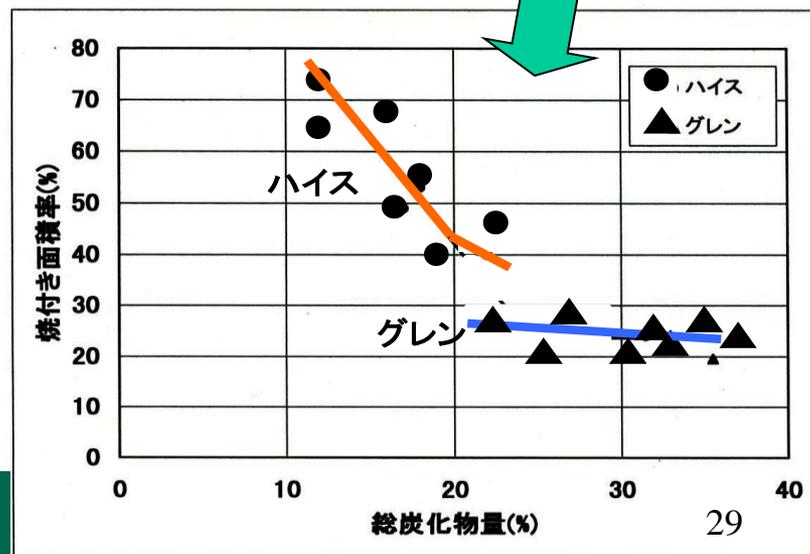
ハイスはき裂が生じやすい

①



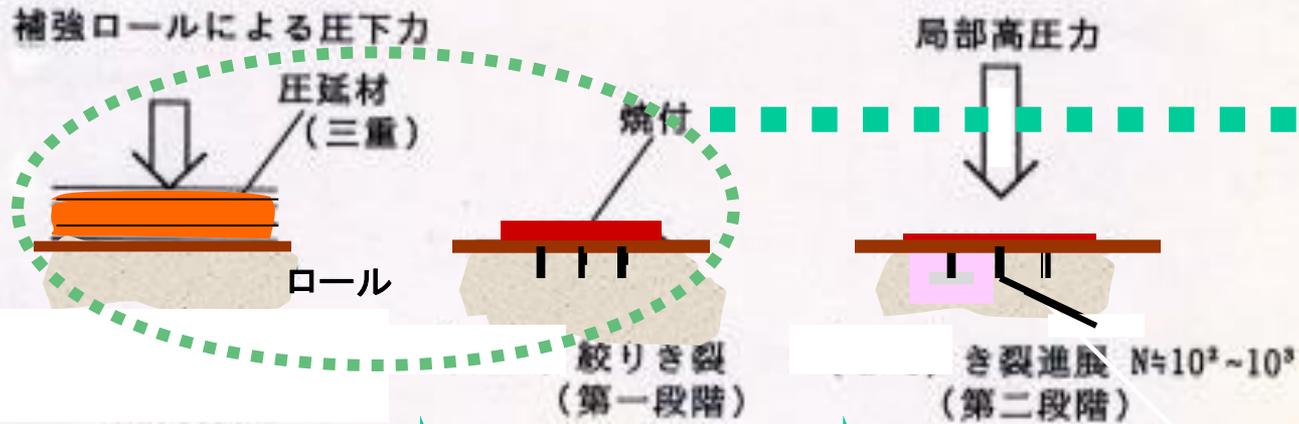
実態順位の再現

②



# 絞り起因の亀裂伝播速度の比較モデル

ハイス



絞り込み

焼付き有無

継続圧延

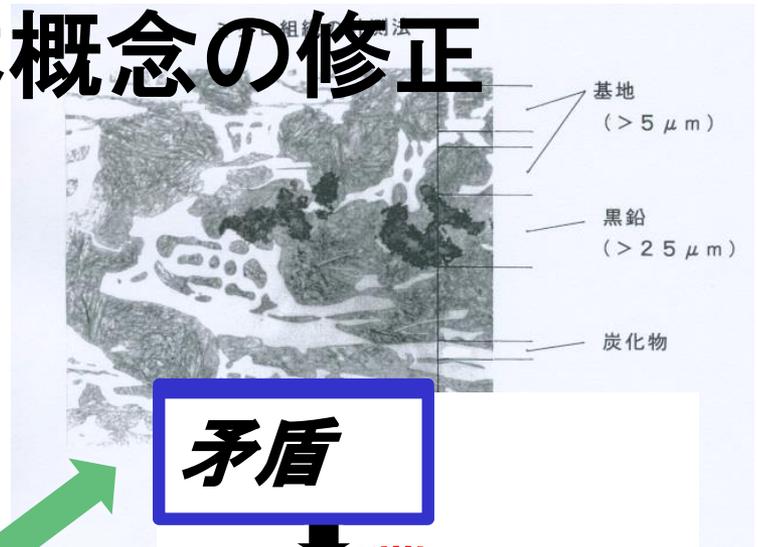
グレン



ロールの早期組み外し

＋き裂自動検出装置の開発(クラウドクレーマ社)

# 熱延ロール材質設計基本概念の修正



## 耐摩耗性

- ・硬さ (常温, 高温)
- ・炭化物
- ・合金

〈修正後〉

引張り強さ  
炭化物の硬さ

## 耐事故性

- ・硬さ
- ・黒鉛
- ・炭化物
- ・靱性

摩擦熱衝撃

矛盾

本質解明

評価(定量化)

材質設計

製造・品質保証

# 各種ロール材の特性要因と摩耗 ーハイスに続く新材質

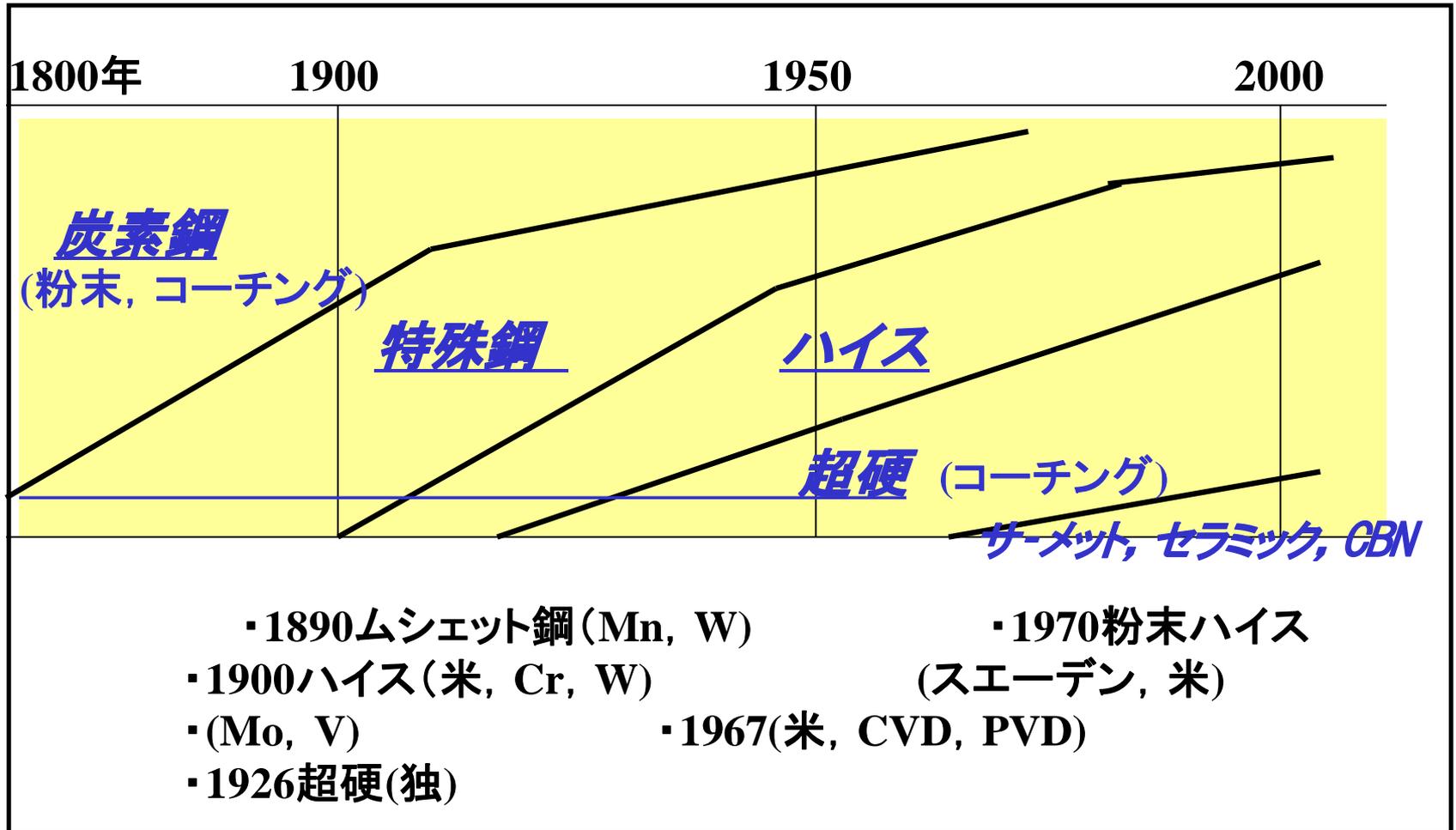
項目	耐摩指数	引張強さ	硬 さ			炭化物		高温硬さ 600C	炭化物硬さ・ 強さ
			MPa	Hs	合成Hv	基地Hv	硬さHv		
グレン	1.0	450	78	635	490	900	35	120	1.4
アダマイト	0.8	600	50	385	350	900	6	80	0.3
高クロム鑄鉄	1.5	700	75	725	500	1400	25	200	2.5
ハイス	4.0	1100	85	1100	680	2800	20	380	6.2
ハイス (粉末)	4.5	1400	85	1000	680	2800	15	380	5.9
ハイス (工具)	2.5	2000	93	1100	800	2800	2	450	1.1
超硬	20	1900	88	2050	300	2800	70	80	39.4
サイアロン	5.0	400	1500Hk	1500Hk	—	1500Hk	100	—	6.0

耐摩耗順位の再現

新材質開発の予見

- ①熱間圧延摩耗試験機 ②炭化物高温硬さ: 常温硬さに同じ  
③等価炭化物硬さ・引張強さ

# 工具鋼の変遷



# ハイスロールの開発から学んだこと

・テーマはユーザーが教えてくれる

・ユーザーの利益に貢献

・第一人者の力を借りる

・柔(ソフト)よく剛(ハード;製品)を制す、  
を知る

・科学的合理性を貫く

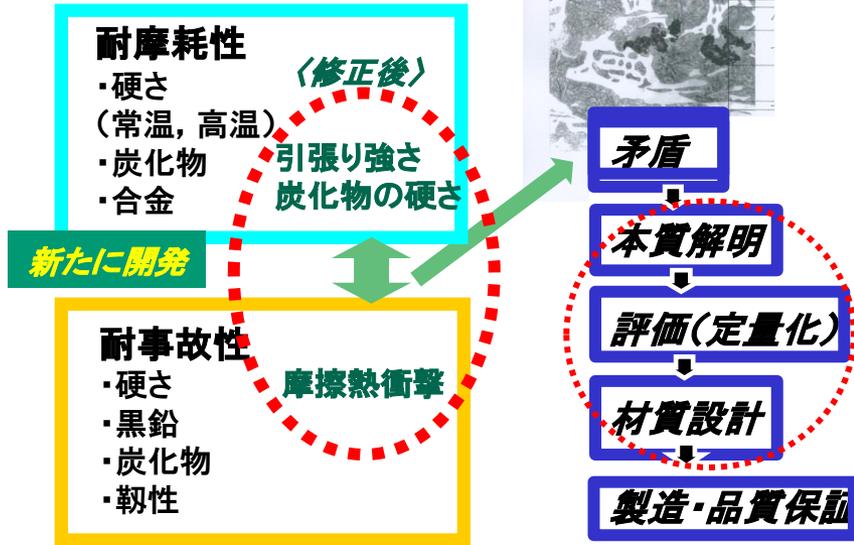
・人知れず、エキセントリックな、しかし着実な  
成果の蓄積と、その理解者、を求める





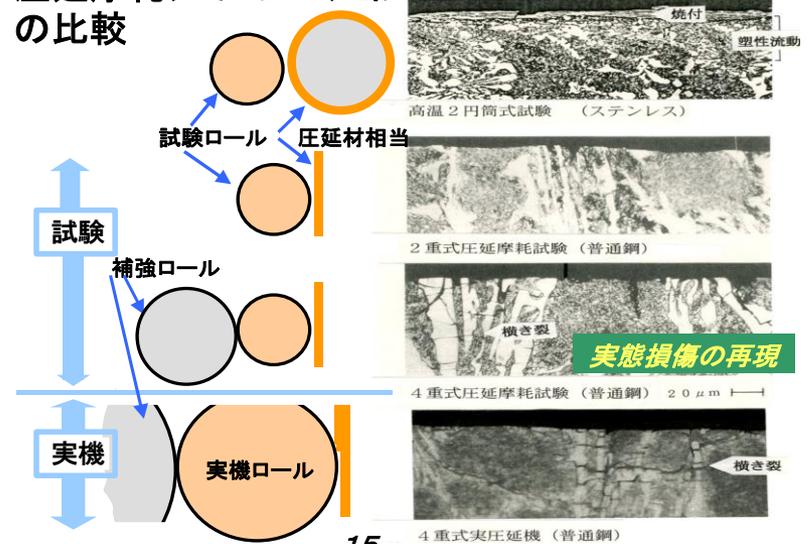


# 1. 熱延ロールのニーズと課題 (耐摩耗, 耐事故)



# 2. 耐摩耗性評価法の比較

## 圧延摩耗シミュレーションの比較

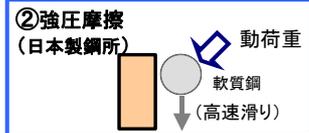
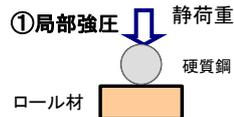


15

# 3. 耐事故性評価法の比較

評価法	グレン	高クロム鑄鉄	ハイス	評価精度
実機評価	○	×	△	—
転動疲労 (引張強さ)	×	△	○	×
破壊靱性	△	△	△	×
熱衝撃	×	△	○	×
局部強圧①	×	△	○	×
強圧摩擦②	○	×	△	○

新たに開発



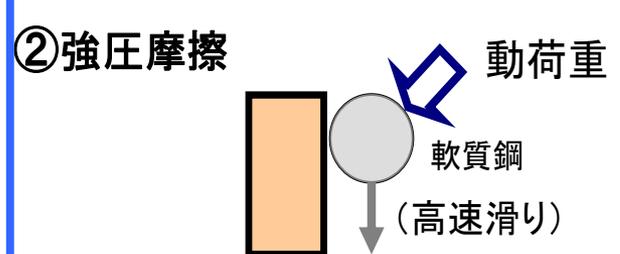
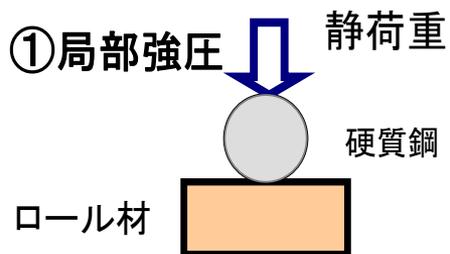
# 4. ハイスロールの開発から学んだこと

- ・テーマはユーザーが教えてくれる
- ・ユーザーの利益に貢献
- ・第一人者の力を借りる
- ・柔(ソフト)よく剛(ハード; 製品)を制す、を知る
- ・科学的合理性を貫く

・人知れず、エキセントリックな、しかし着実な成果の蓄積と、その理解者、を求める

新たに開発

評価法	グレン	高クロム鋳鉄	ハイス	評価精度
実機評価	○	×	△	—
引張強さ (転動疲労)	×	△	○	×
破壊靱性	△	△	△	×
熱衝撃	×	△	○	×
局部強圧①	×	△	○	×
強圧摩擦②	○	×	△	○









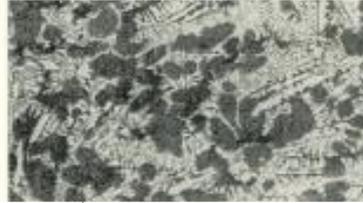


# 在来ロールの摩耗と特性

ミクロ組織

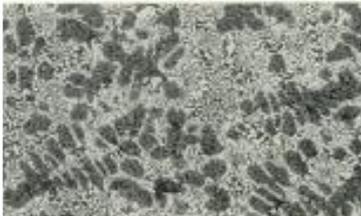


アダマイト



グレン

100µm



高クロム

異材質の耐摩耗性

高温硬さ

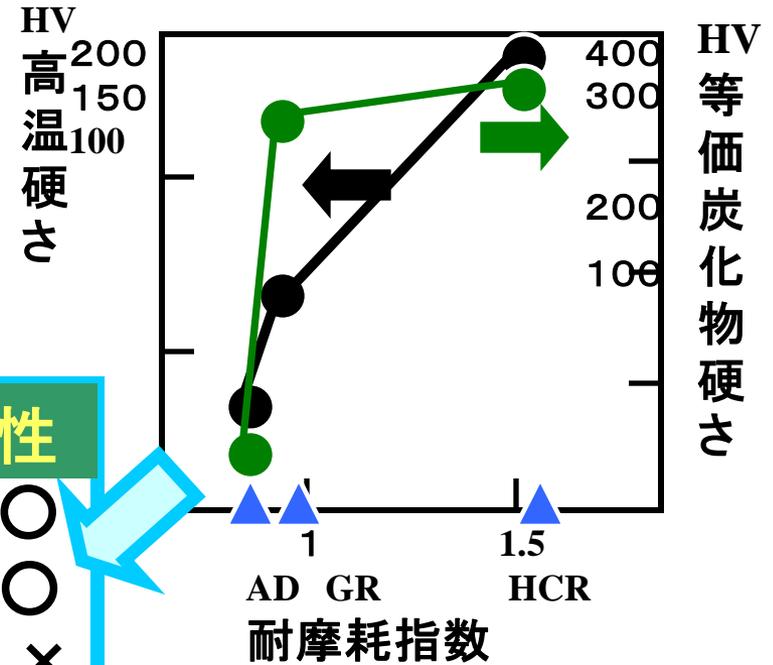
等価炭化物硬さ

硬さ, 炭化物量、微細

○

○

×



## 摩耗と特性

項目	耐摩 指数	引張 強さ	硬 さ		炭 化 物		高温硬さ 600C	炭化物 硬さ・強さ	
			MPa	Hs	合成 Hv	基地 Hv			硬さ Hv
グレン	1.0(基準)	450	78	635	490	900	35	120	1.4
アダマイト	0.7~1.2	600	50	385	350	900	6	80	0.3
高クロム鋳鉄	1.2~2.0	700	75	725	500	1400	25	200	2.5

(1)

(2)

(3)

(1) 熱間仕上圧延機の実績 (2) 炭化物高温硬さ: 常温硬さに同じ (3) 等価炭化物硬さ・引張強

# 摩耗試験シミュレーションの条件

	大分類	項目	DINの要件*
<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">外的</div> <div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center; margin-right: 10px;"> <div style="border-bottom: 1px solid black; width: 20px; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> <div style="width: 20px; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-left: 10px;">材料</div> </div>	運動学的	すべり速度 ( $\Delta V$ ) 接触時間 継続/断続	○ ○ ○
	応力	接触圧力 ( $P_m$ ) ← 摩擦力 ( $\mu P_m$ ), $\mu$ : 摩擦係数	○
	熱的	くり返し数 ( $n$ ) 温度上昇 ( $\Delta T$ ) 相手材の温度 ( $T$ ) ←	○ ○
	幾何学的	接触幅 ( $l$ ) あらさ ( $R_{max}$ )	○
	潤滑	潤滑材の特性 ← 化学反応 水冷 雰囲気	○ ○
	材質特性	弾性係数 強さ 硬さ(常温、高温) マイクロ組織	
	表面性状	酸化膜生成特性 酸化膜安定特性 (相互の凝着性) 塑性流動 加工硬化/軟化	

**熱延ロールの特殊要因**  
  
**二つの相手材**  
 (補強ロール: 弾性)  
 (圧延材: 塑性, 高温)  
**スケール介在**

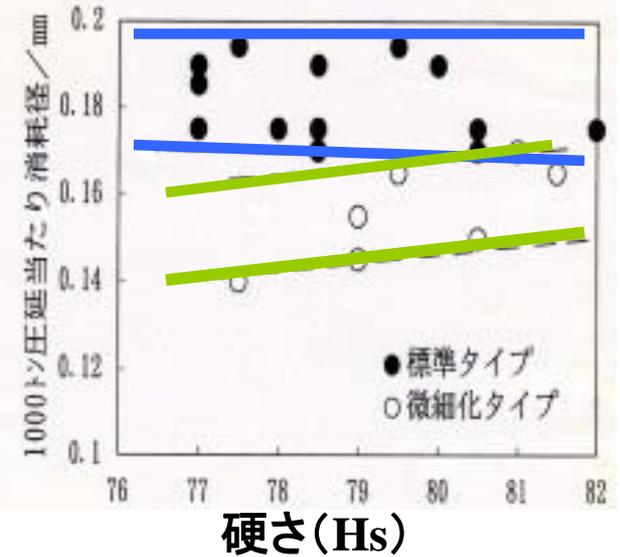
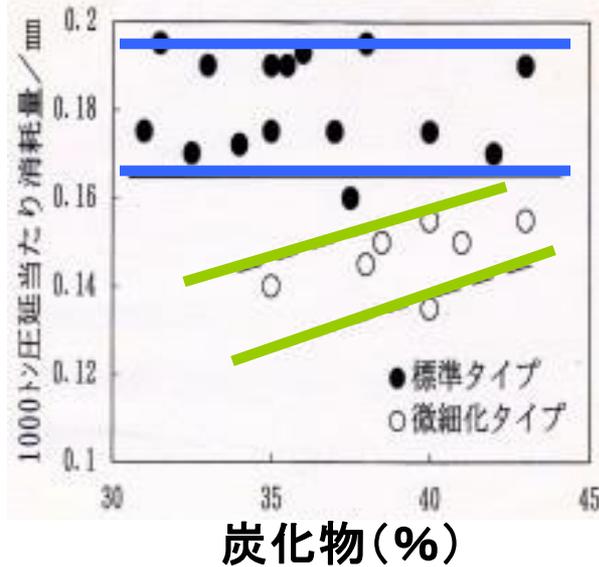
**必須条件**

※ 摩耗試験で具備すべき要因のDIN原案 (出所)小豆島

# 耐摩耗性と ロール特性

(グレンロール  
仕上げ後段)

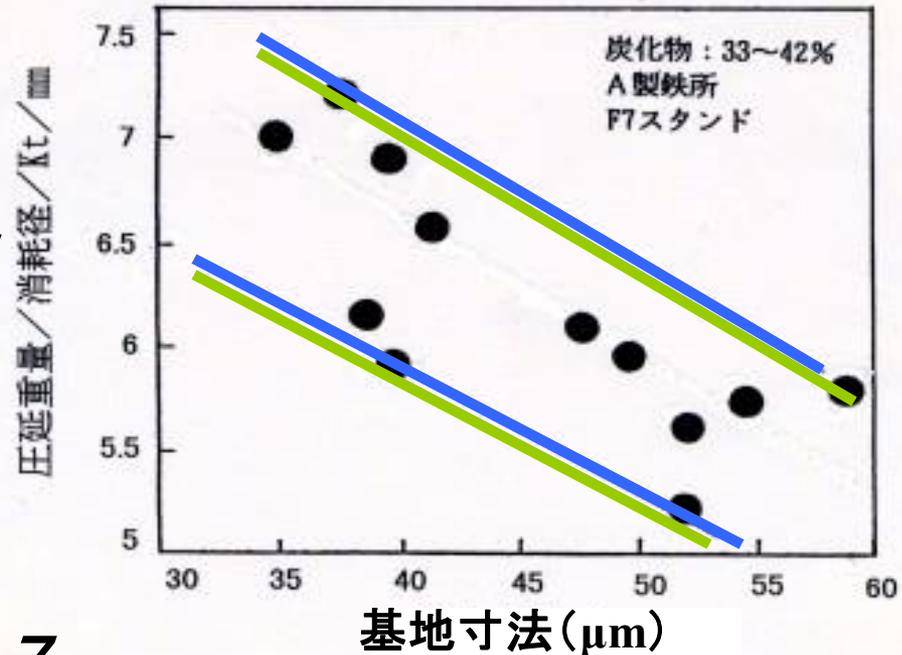
良



## 同一材の耐摩耗性

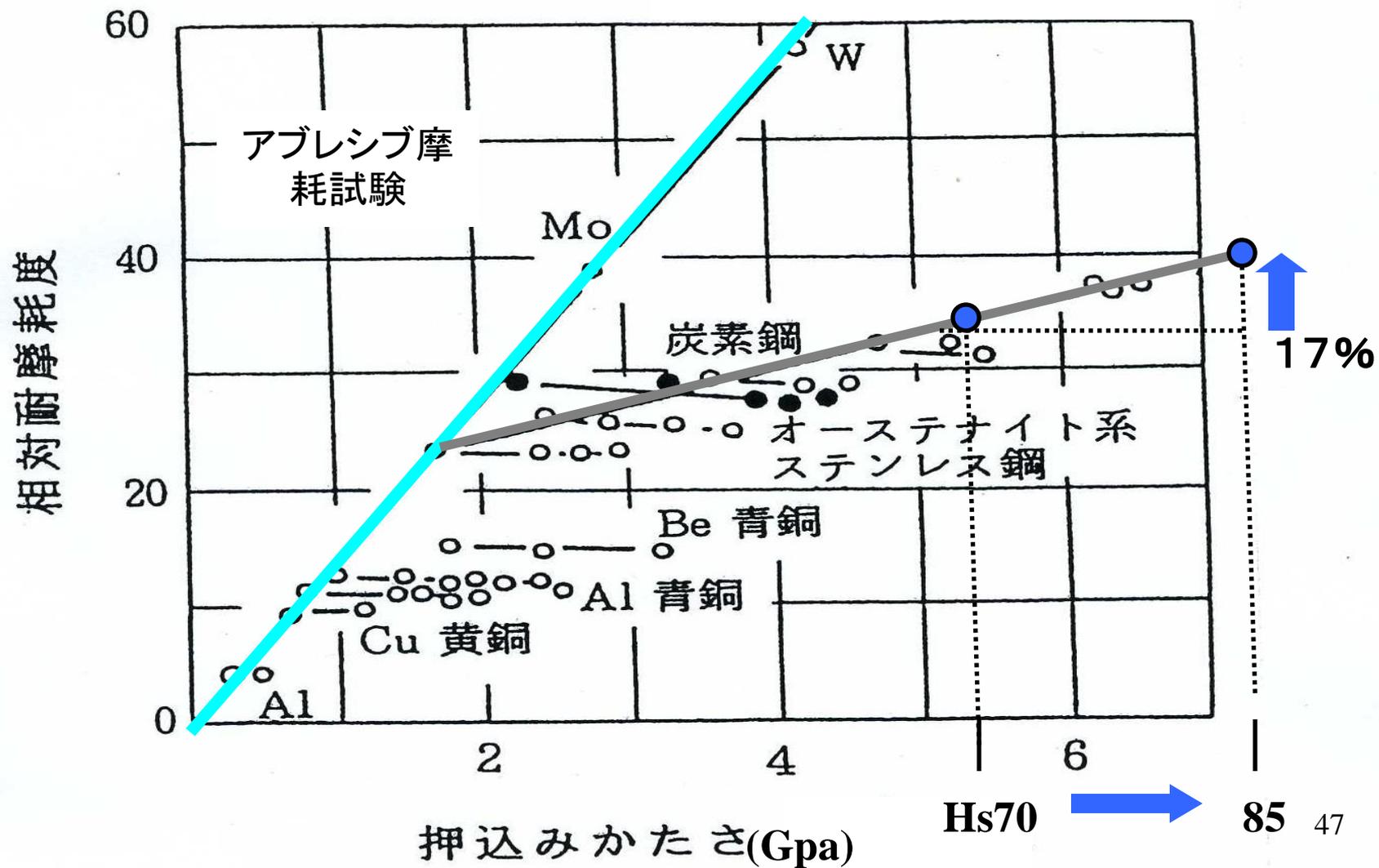
炭化物 —  
硬さ(ミクロ) —  
微細化 ○

良



7

# 硬さとアブレシブ摩耗の関係



# スポーリング事故防止の考え方と評価

区分	事故防止の考え	改良 レベル	完全 レベル
ロール	き裂発生防止	△	×
	き裂進展防止	△	×
	飛散防止	△	×
圧延	絞り込み防止	△	×
	絞り直後の組換	○	○
管理	疵検出	○	○
	疵除去	○	○

# ロールトライボロジの取組みとモチベーション

薄板製鉄所,ミルメーカー技術幹部,スタッフとの疎通,連携  
(例)

①熱延ロールのトライボロジー上の位置づけ

笹田教授(東工大):

熱い.速い、きつい(+繰り返し、トラブル)の代表

②熱間圧延トライボロジーへの本格的アプローチ

木原教授(東大):

4段式縦型熱間圧延摩耗試験機の開発支援

③絞りき裂への対応

N製鉄副所長:

“ハイスロール開発に先行した絞り事故撲滅”約束④

ロール軸強化による形状制御機能の高度化

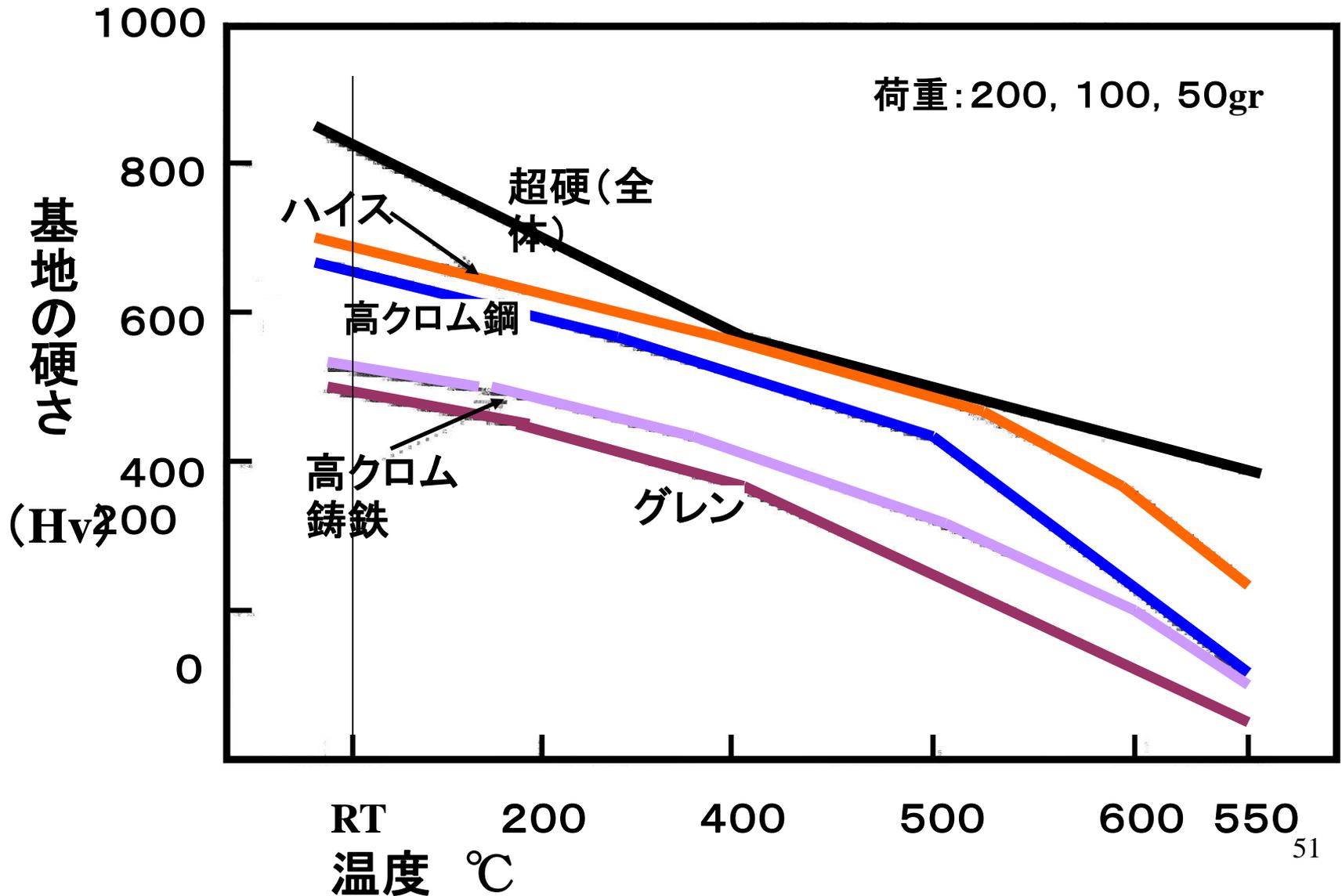
梶原技師長(日立製作所):

強度40(鑄鉄)→60kg/mm<sup>2</sup>(鋼):製造法の革新

# 従来の耐絞り亀裂性評価法の比較

区分	モデル	負荷の特徴	損傷の特徴	実体再現精度	
				損傷	順位
静	<p>強さ</p> <p>引張</p>	引張抵抗	引張破断	×	×
衝撃	<p>熱衝撃亀裂</p> <p>きれつ</p>	熱応力への抵抗	冷却収縮時の引張亀裂	×	×
静	<p>破壊靱性</p> <p>切欠き きれつ</p>	亀裂下の引張抵抗	亀裂下の引張亀裂	×	△ (○:同材)

# ロール材の基地高温硬さ



# ロール材質評価と開発の関連

新ロール開発で必須

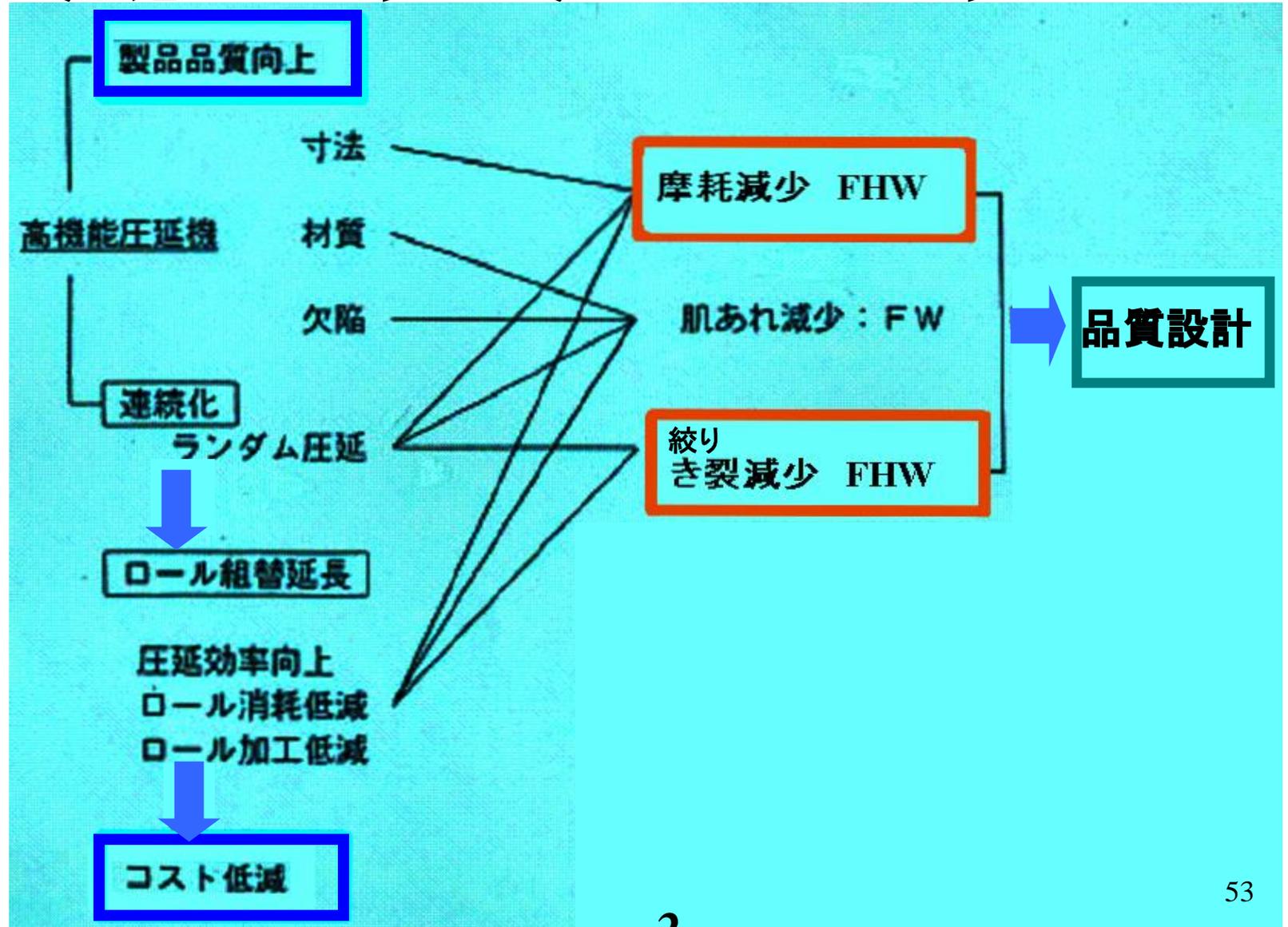


方法区分	旧来の方法		圧延摩耗試験機
	実圧延機 (試行錯誤)	簡易摩耗試験機	
評価精度	△	×	○
評価スピード	× (3年以上)	○	○ (1年以下)
費用	×	○	△
新ロール開発可否	× (海外先行) 改善レベル	×	○ (自社開発可)

# 熱延ロールのニーズ

〔圧延のニーズ〕

〔ロールへのニーズ〕



# 世界の動向とロールの指向

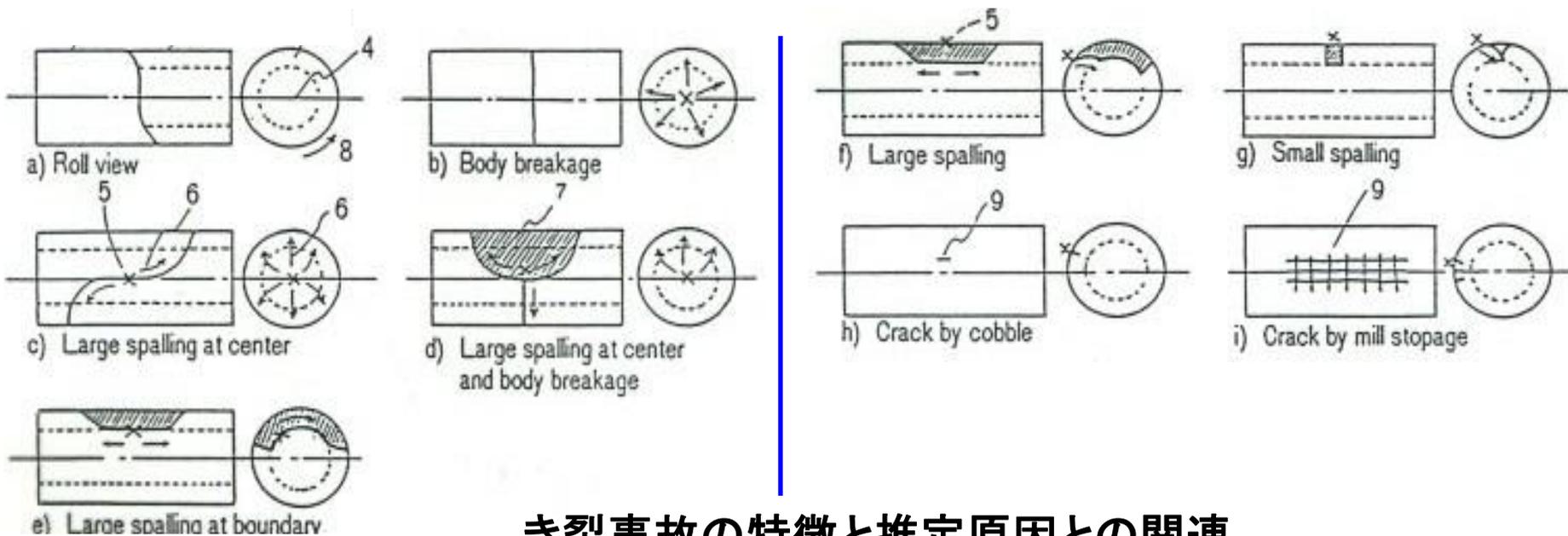
改良レベルのロールでは

我国鉄鋼の革新に寄与できない

地球 ・世界	自動車 (最大の鉄鋼需要)	日本の鉄鋼		薄板ロール	
		薄板	圧延	ニーズ	新技術
環境	軽量化 低燃費	超ハイ テン	低温・ 高圧下	耐摩耗 (3倍以上)	ハイスの高度化
資源	低コスト (リサイクル)	低コスト	スケ ジュール フリー  連続	耐焼付	超硬ロール の開発 <u>【スーパー サーメット ロール】</u>



# 胴部破壊事故とき裂事故の原因分析



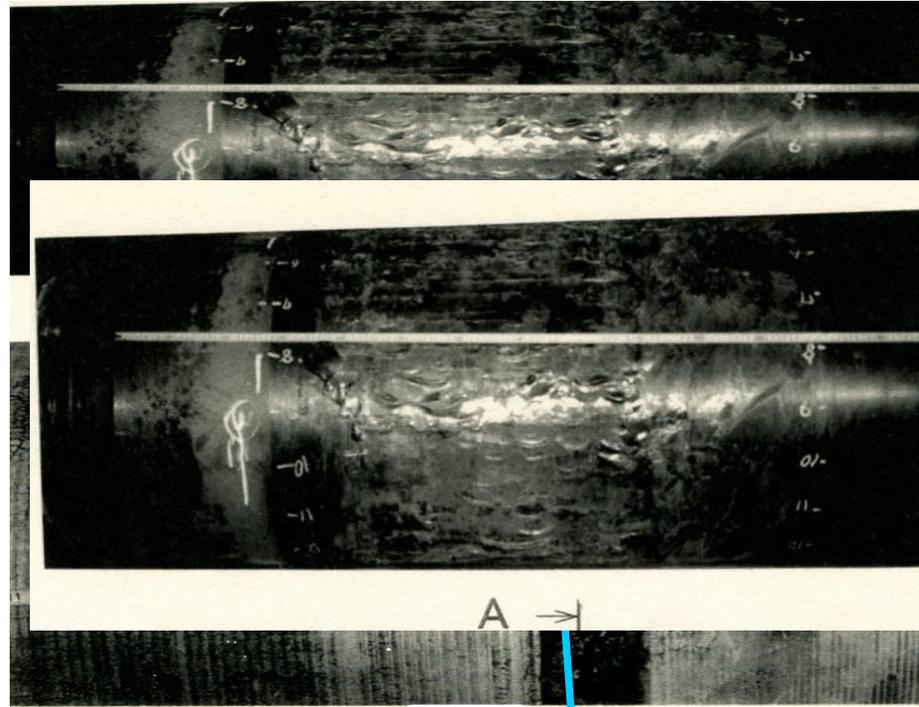
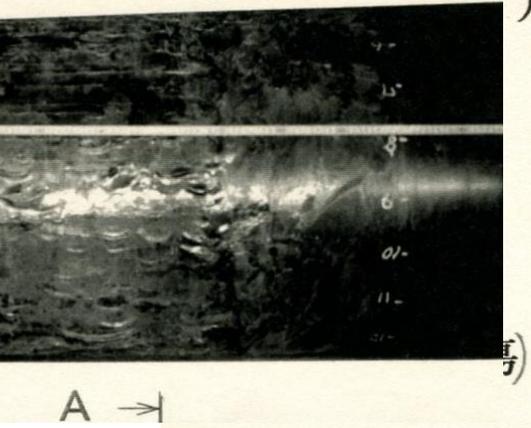
## き裂事故の特徴と推定原因との関連 (き裂、スポーリング事故80本の分析)

Character of breakage		推定原因		
Item	Result	欠陥	絞り込み	転動疲労
Outor view	Crack > Spalling	○	○	—
Inside damage	Spalling > Crack	○	○	○
Propergating direction of spalling	Opposition to rolling direction	○	○	○
Position of spalling	Uniform distribution along axis	○	○	×
Position of crack	Uniform distribution along axis	○	○	×
Size of spalling and crack	Spalling : < 100 mm most	—	—	—
Max. depth of breakage	Crack : 10~14 mm most	—	—	—
Number of stand	< 20 mm most	—	—	—
Upper/bottom in stand	6 > 7 > 5 > 4 st in 7 st mill	—	△	×
Roll diameter	Equal	○	○	○
	Large > Small	—	○	×

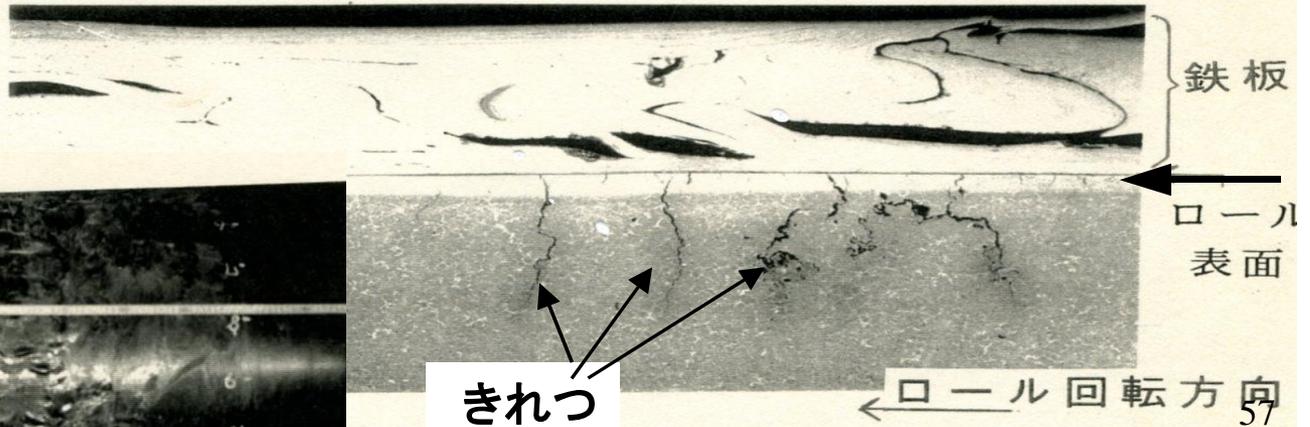
Remarks : ○ Strong connection, △ Small connection, × Counter connection, — Nonconnection

# 絞り込み事故ときれつ発生

ロール外観



↑ 回転方向



# 耐絞りきれつ性の評価法

耐絞りきれつ性: ハイス < グレン

①引張り強さ: ハイス >> グレン

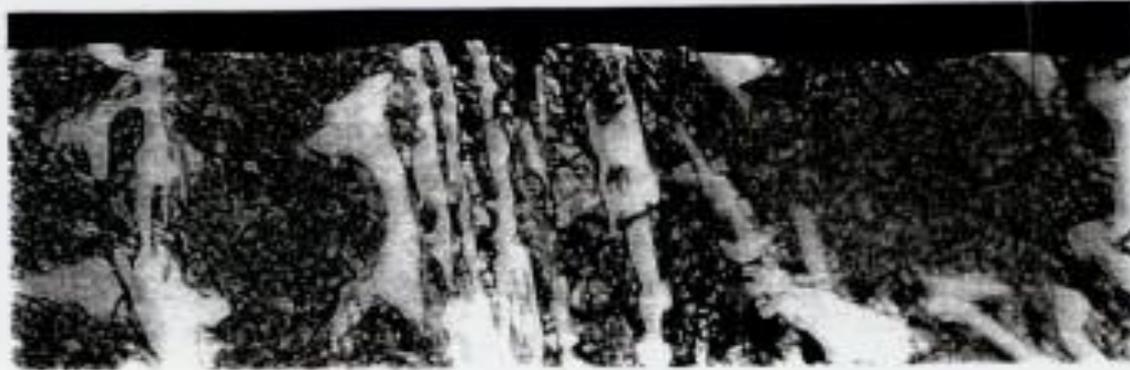
②破壊靱性: ハイス ~ = グレン

③摩擦熱衝撃:  
特性

ハイス < グレン

# 内部損傷の4重化による影響

2重式



(a) 2重式圧延摩耗試験後

20  $\mu$ m

横亀裂  
4重式  
縦亀裂

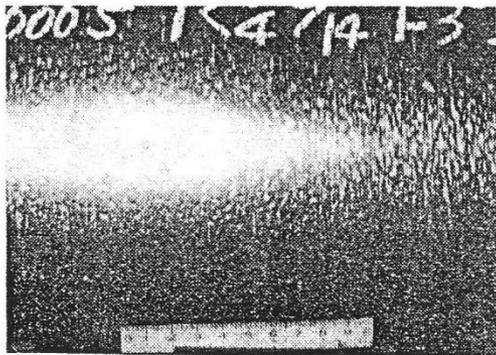


(b) 4重式圧延摩耗試験後

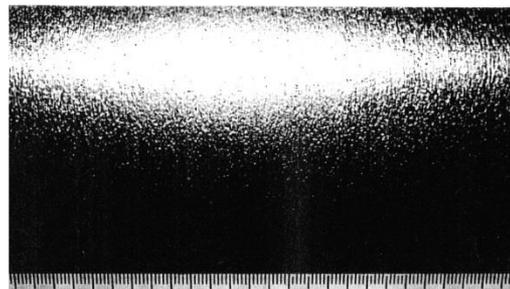
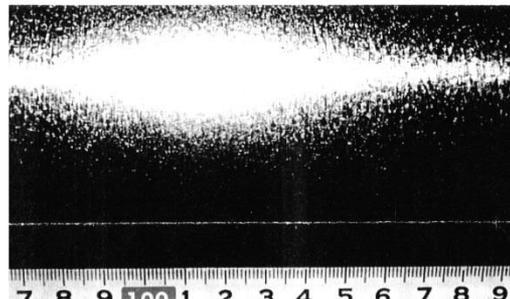
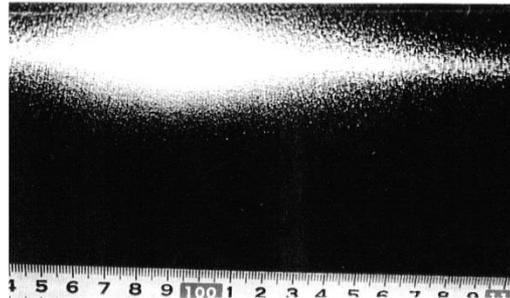
20  $\mu$ m

# 熱延ロールの肌荒れ

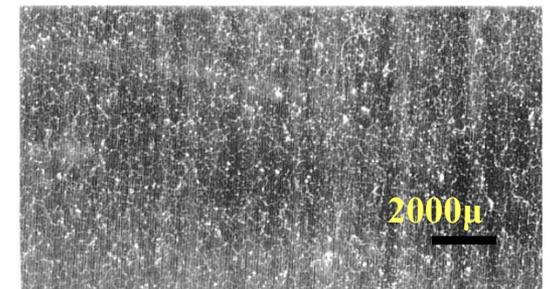
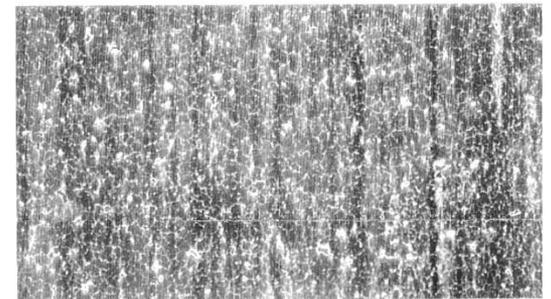
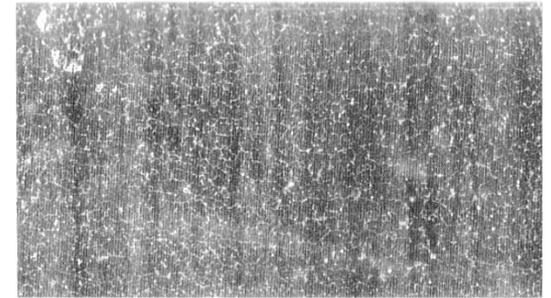
アダマイト F2



ハイス F2

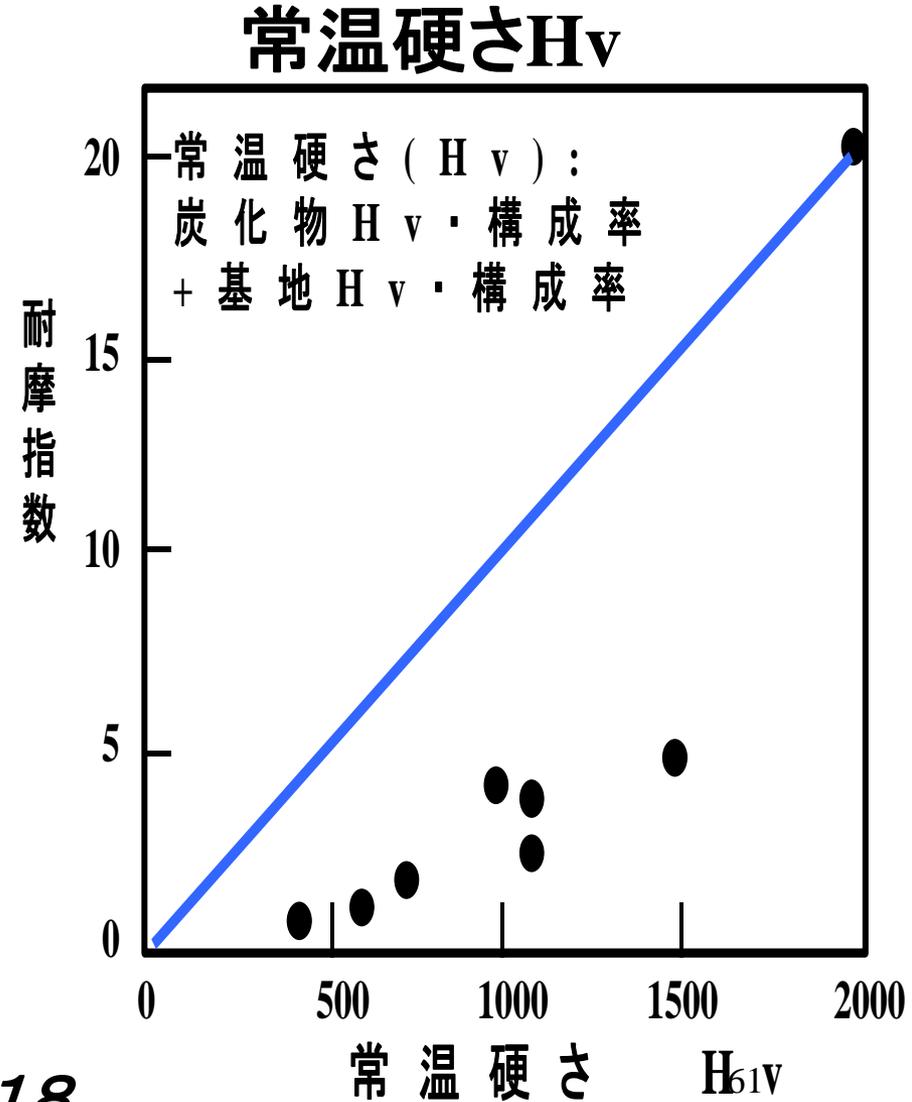
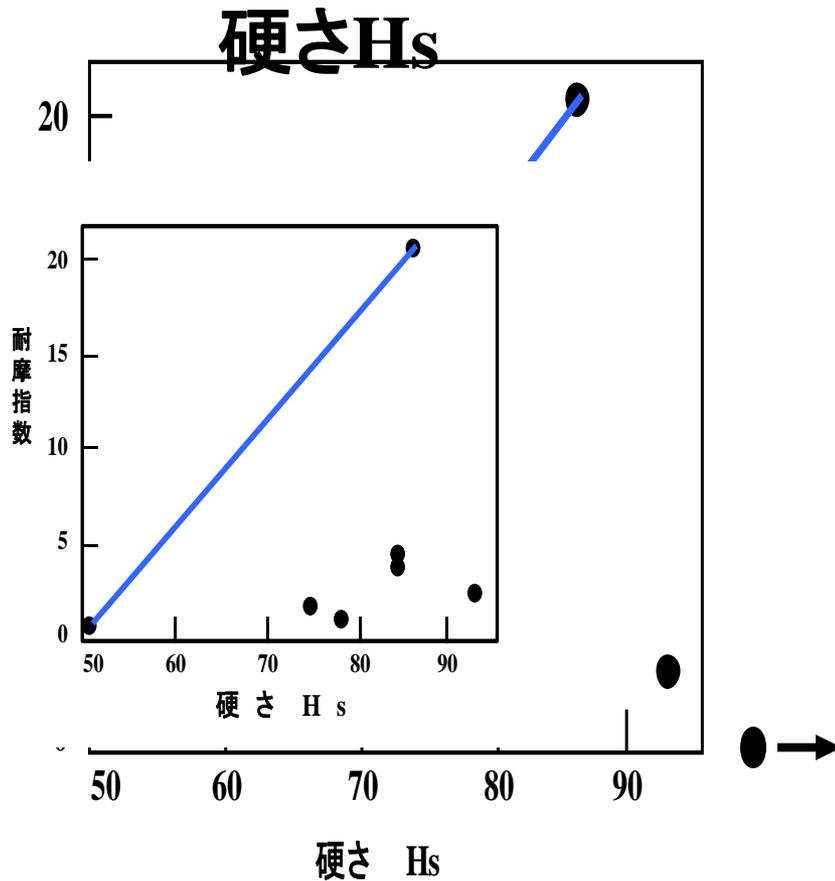


5



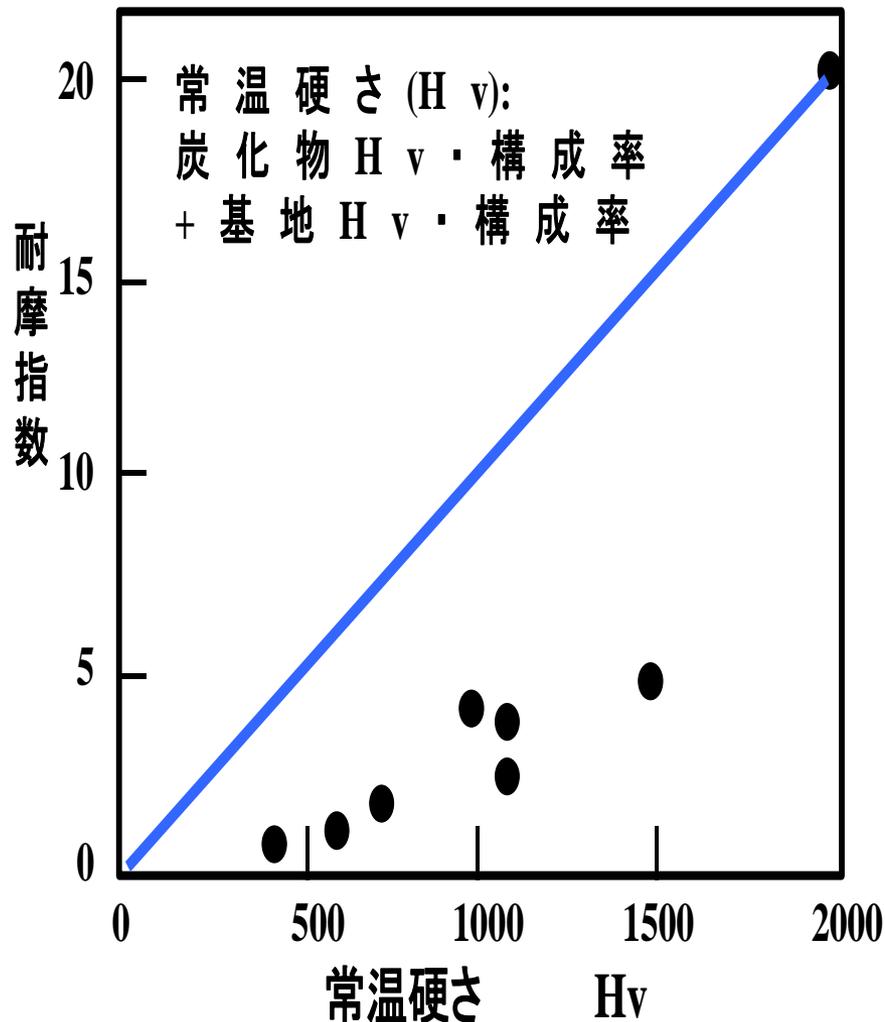
60

# 摩耗と硬さHs, 常温硬さHv

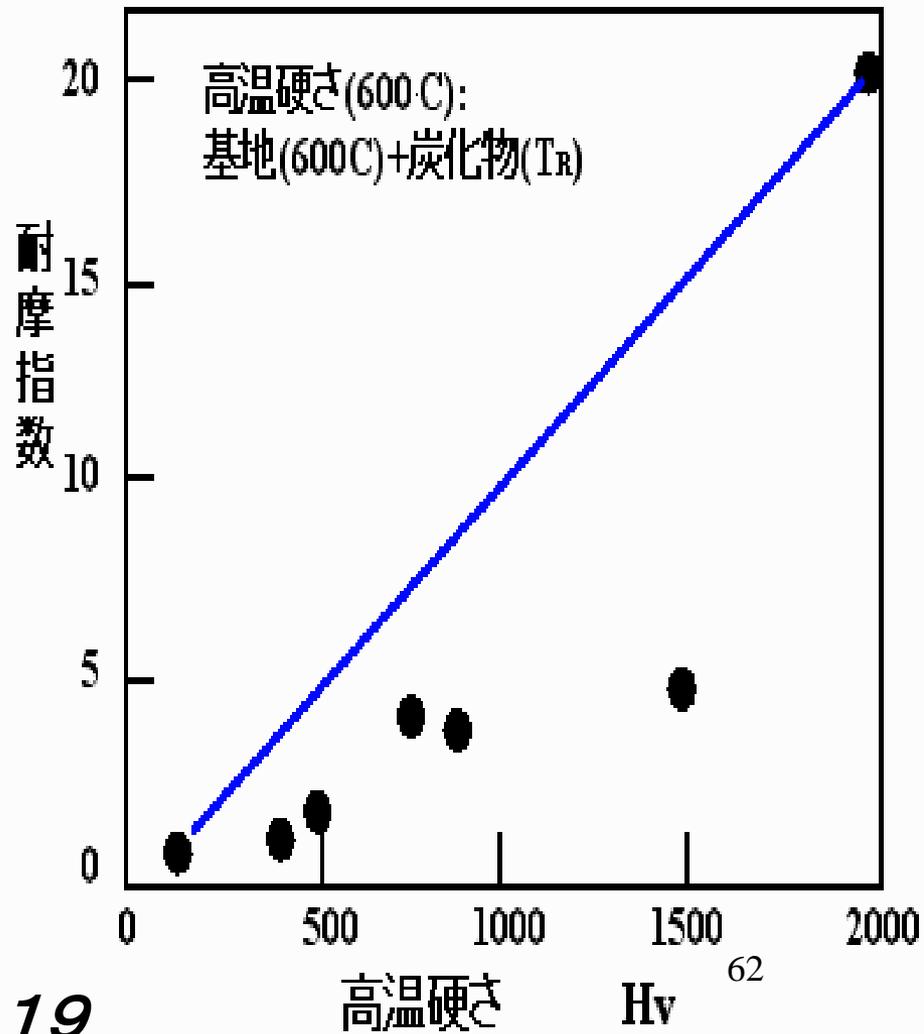


# 摩耗と常温硬さHv,高温硬さHv

## 常温硬さHv

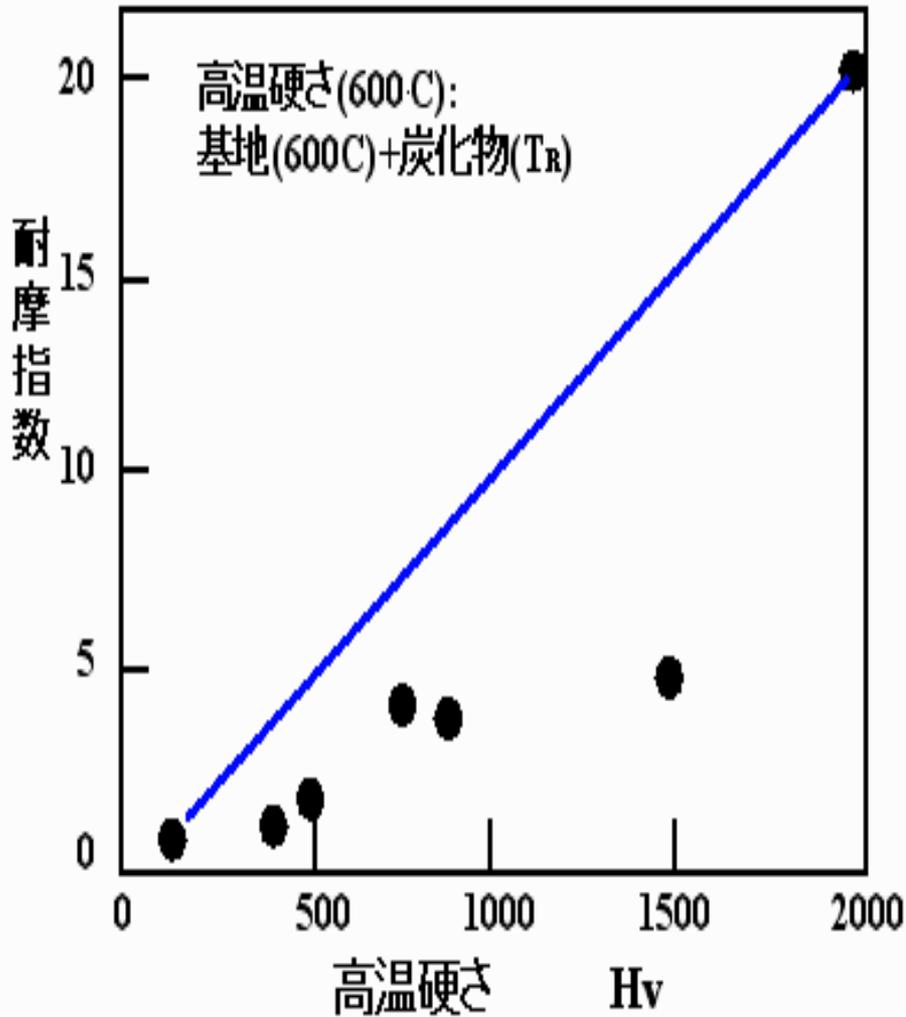


## 高温硬さHv

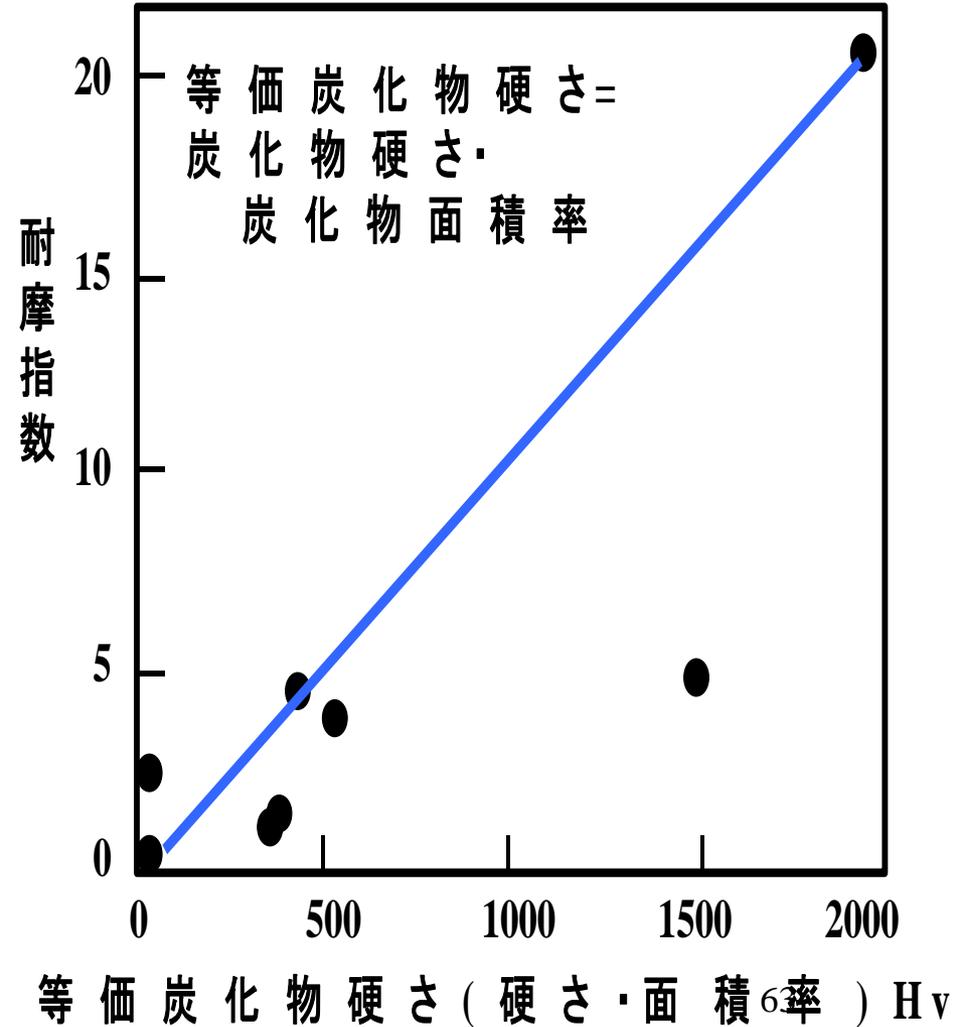


# 摩耗と高温硬さ,炭化物硬さ

## 高温硬さ

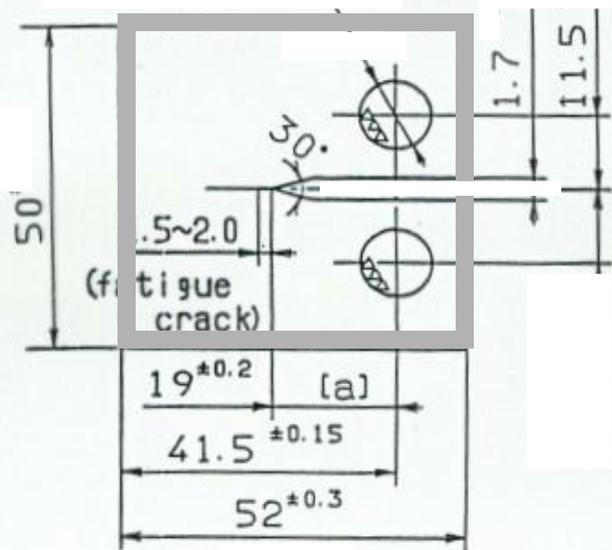


## 炭化物硬さ



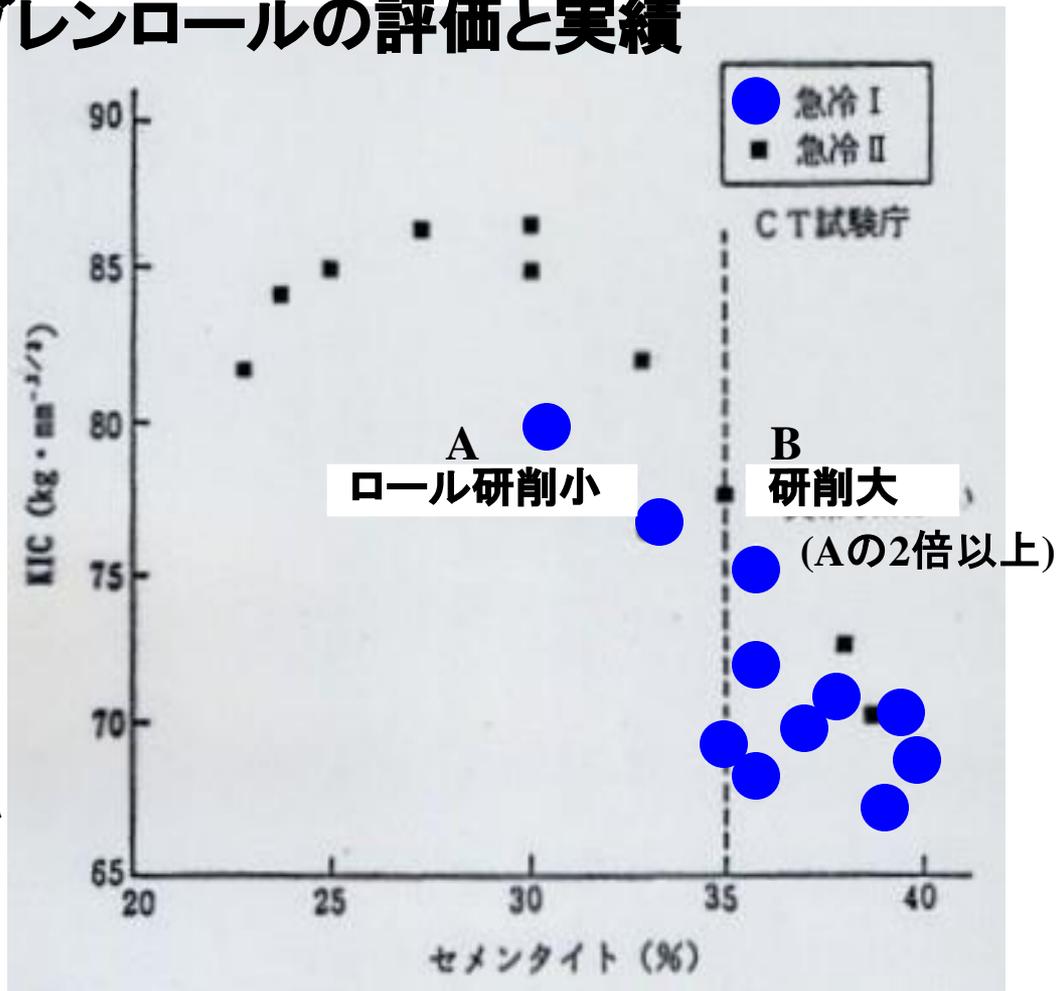
# 破壊靱性による耐事故性評価

## 破壊靱性試験片



**破壊靱性値  
同一材質で  
は評価可**

## グレンロールの評価と実績



# 各種ロ-ル材の特性要因と摩耗

## ーハイス優位性の裏付けー

項 目	耐摩 指数	引張 強さ	硬 さ			炭 化 物		高温 硬さ 600C	炭化物 硬さ・ 強さ
			MPa	Hs	合成Hv	基地 Hv	硬さ Hv		
グレン	1.0	450	78	635	490	900	35	120	1.4
アダマイト	0.8	600	50	385	350	900	6	80	0.3
高クロム鑄	1.5	700	75	725	500	1400	25	200	2.5
ハイス	4.0	1100	85	1100	680	2800	20	380	6.2
ハイス(粉末)	4.5	1400	85	1000	680	2800	15	380	5.9
ハイス(工具)	2.5	2000	93	1100	800	2800	2	450	1.1
超硬	20	1900	88	2050	300	2800	70	80	39.4
サイアロン	5.0 (1)	400	1500Hk	1500Hk	—	1500 Hk	100	— (2)	6.0 (3)

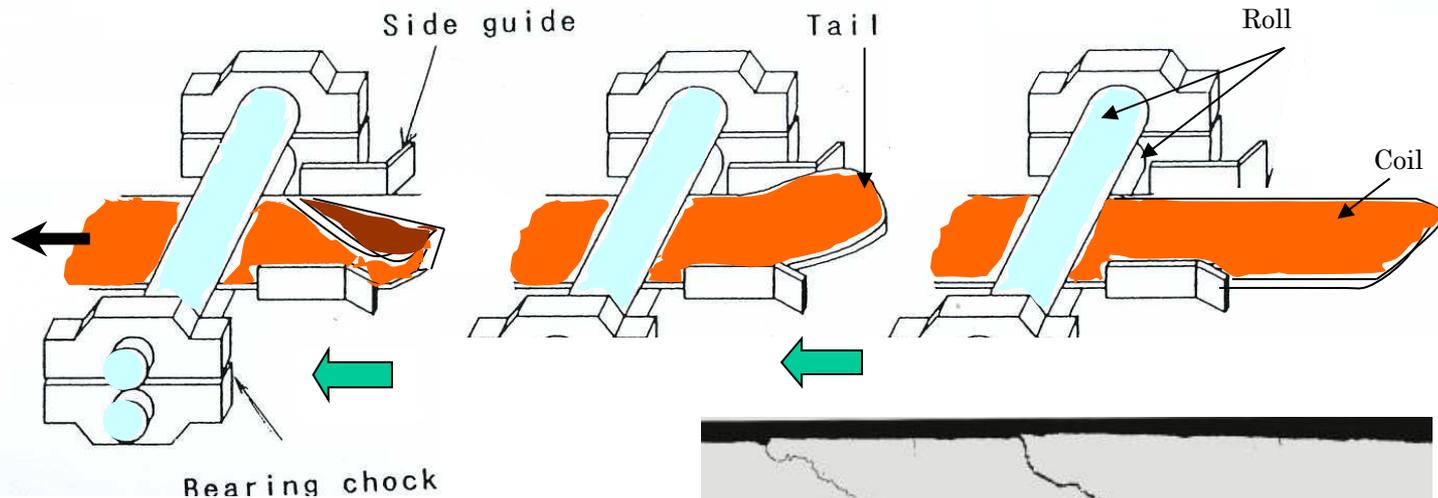
耐摩耗順位の  
再現



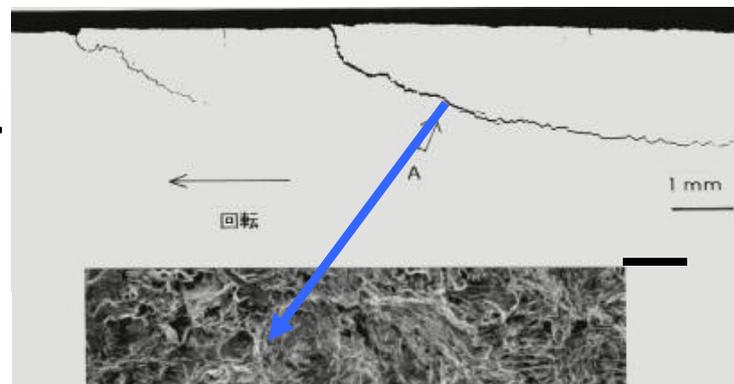
新材質開発の予見

(1)熱間圧延摩耗試験機 (2)炭化物高温硬さ:  
常温硬さに同じ (3)等価炭化物硬さ・引張強さ

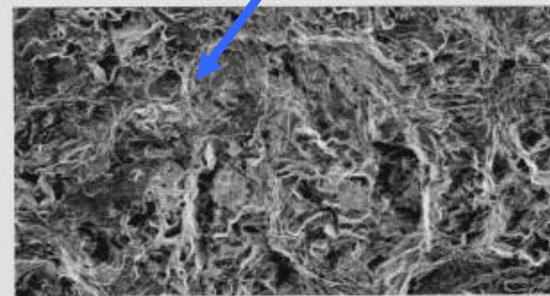
# 絞込みのプロセスと絞りき裂



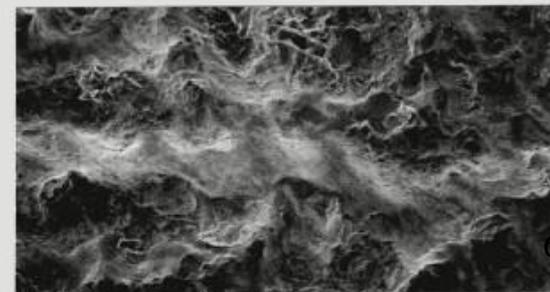
## き裂断面



## 断面 SEM



(a) 絞りき裂後約100回転 (A)



(b) 同 5 x 10回転 (Aと異なるロール)

## 表面き裂

