



脱炭素に
技術と叡智
IHI

九州産業保安監督部

令和5年度ボイラー・タービン主任技術者会議（九州） 講演資料

火力発電ボイラにおける 保守高度化と工期短縮に向けた取り組み

IHI

2024年2月14日

株式会社 **IHI**

資源・エネルギー・環境事業領域

カーボンソリューションSBU

プロジェクト統括センター

国内プロジェクト部

大澤 肇

目次

1. はじめに
2. ボイラ保守運転支援システム(MEDICUS NAVI)
3. ボイラ点検補修における新技術導入
4. 耐圧部の延命対策
5. おわりに

1. はじめに

1. はじめに - 事業内容とSDGsの取り組み

事業領域と製品群

資源・エネルギー・環境事業

(ボイラ, ガスタービン, ガスエンジン, LNGターミナル, プロセスプラント, 原子力機器 他)

目標7: エネルギーをみんなにそしてクリーンに



目標13: 気候変動に具体的な対策を

航空・宇宙・防衛事業
(ジェットエンジン, ロケット)



SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



社会基盤・海洋事業
(橋梁, 交通システム, 安全 他)

産業システム事業

(製鉄機械, 熱処理・表面処理, 物流システム 他)

汎用機械事業

(圧縮機, 分離機, ターボチャージャー 他)

1. はじめに - IHI カーボンニュートラル2050

IHIカーボンニュートラル2050

IHIグループは、2050年までに、
バリューチェーン全体でカーボンニュートラルを実現する

カーボンニュートラルに向けた主な取組み

事業活動	調達活動	環境に配慮している取引先の積極的な採用
	生産活動	自社製品・システムを含む新技術の先駆的採用
		燃料転換
		再生可能エネルギー利用
製品・サービス	既存技術の活用 トランジション	既存発電所の高効率化
		製品の軽量化・電動化
		再生可能エネルギーの活用
	新技術の導入 トランスフォーメーション	水素・アンモニアの利用
		カーボンリサイクルの実現

1.1 はじめに

背景

火力発電を取り巻く環境の変化

- 温室効果ガスの削減（2030年^{*1}，2050年^{*2}）
- 定検期間短縮，定検インターバル延長（4年から6年）
電力小売りの全面自由化，再生エネルギーの増加
プラント稼働率向上（メンテナンスコスト削減）

課題

定検期間短縮，定検周期延伸の課題

- 定検インターバル延長にともなう連続運転期間の長期化
- 工事期間の短縮（計画工事，突発工事の削減）
- 計画外プラント停止の削減と復旧工事期間の短縮化
- 労働人口減少に伴う工事作業員確保 etc...

*1: 2013年度比46%削減
*2: カーボンニュートラル

新技術 の導入

- DT/ITでプラントの運転状態・劣化状態を把握し，計画的な補修を立案
- 工期短縮につながる検査技術や工法・手法を導入

1.1 はじめに

提供価値

稼働率UP	計画外停止の予防 ボイラ耐圧部, 大型回転機, ミル等の予防保全, 運転支援
	計画外停止からの早期復旧 特急補修対応
	定検停止期間の短縮 最適な工法提案, 特急補修対応, インターバル延長
効率UP・ 環境負荷低減	プラント効率の改善 湯きガス損失, 未燃損失, 所内動力等の改善
	環境負荷の低減 水素・アンモニア, バイオ燃料の活用
運用性UP ・OPEX削減	多炭種対応 制御最適化, 石炭の評価・選定, ブレンド支援等
	最低負荷低減・負荷応答性の向上 再生エネルギー導入対応等
	保守管理の高度化 検査・工事履歴管理の効率化, 可視化
	省人化・無駄な検査, 工事の削減 部品損傷予測, 寿命診断

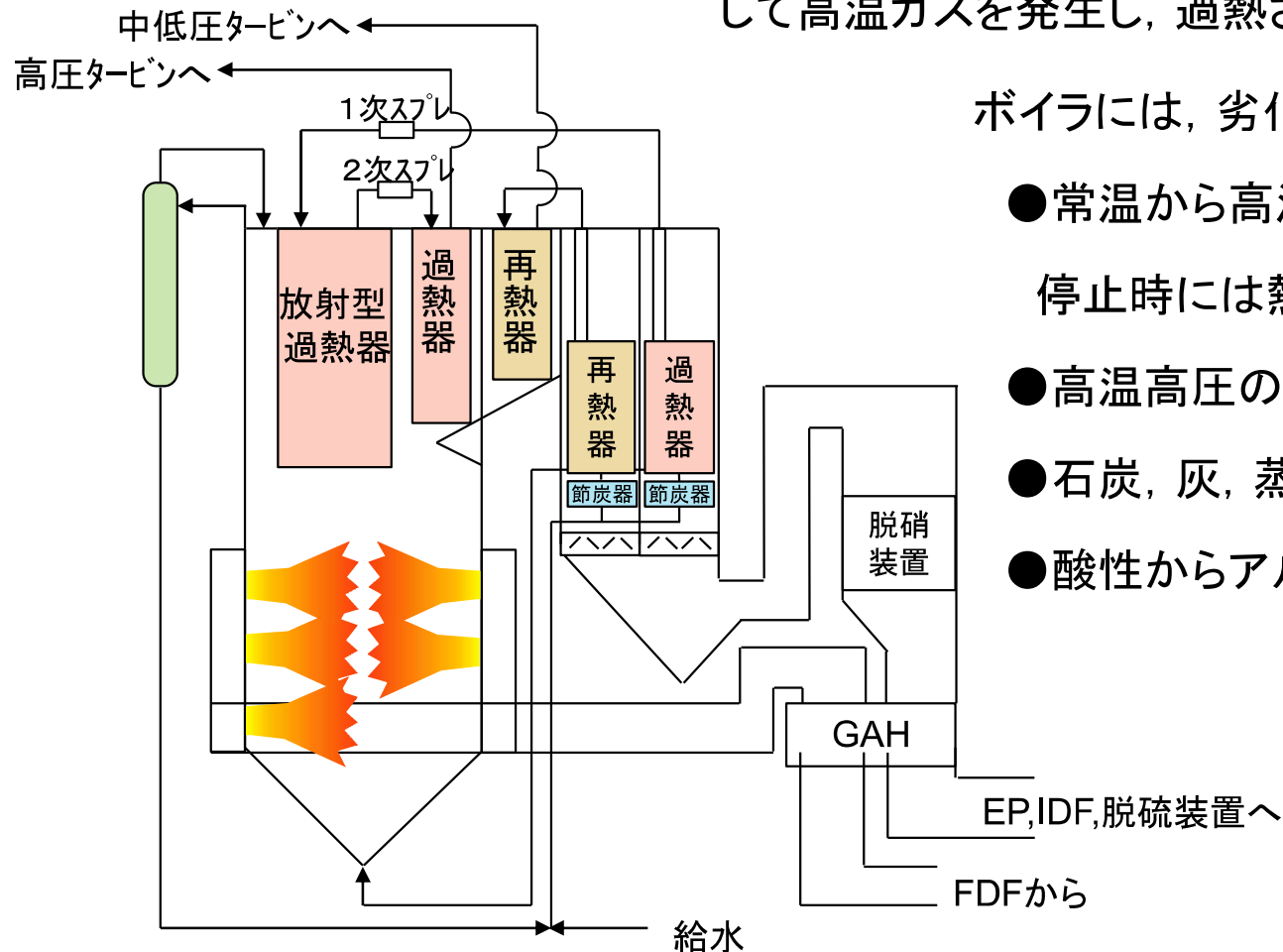
1.2 ボイラの劣化・損傷

ボイラの劣化・損傷の背景

ボイラは火炉を持つ熱交換器であり、火炉では燃料が燃焼して高温ガスを発生し、過熱された蒸気は高温・高圧となる。

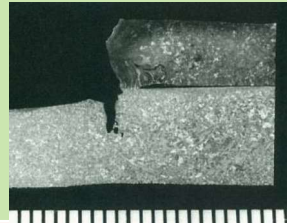
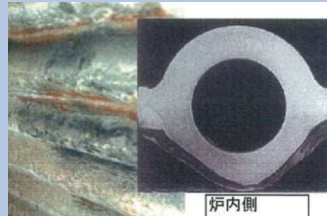
ボイラには、劣化や損傷につながる環境が存在。

- 常温から高温までの部位が存在し、起動・停止時には熱伸びに差が発生(**疲労**)
- 高温高圧の過酷な使用環境(**クリープ**)
- 石炭、灰、蒸気などの**摩耗**環境
- 酸性からアルカリ性まで幅広い**腐食**環境



1.2 ボイラの劣化・損傷

ボイラの損傷形態について代表的な損傷例を以下に示す。

形態	事象	サンプル
疲労	熱歪や振動の繰返しで損傷	 
クリープ	過熱による管の強度低下で損傷	
摩耗	石炭, 灰, 蒸気による摩耗減肉で損傷	
腐食	燃料ガス中の腐食成分による減肉で損傷	

1.2 ボイラの劣化・損傷

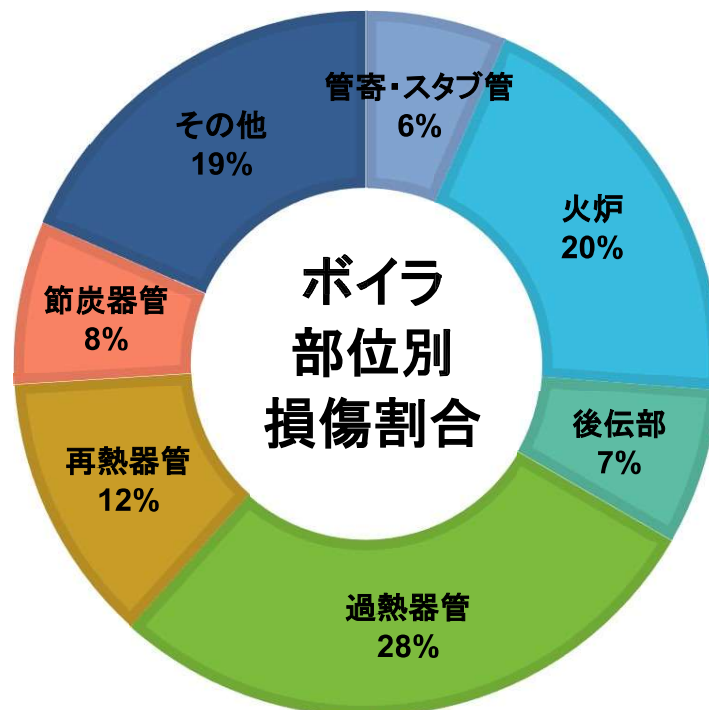
ボイラの部位別の損傷割合に示す通り、過熱器、火炉、再熱器での損傷が多く、3箇所の合計は全体の約6割を占める。

その耐圧部において、要因別に集計すると、「クリープ損傷および疲労」が多い。

ボイラでは、寿命や損傷を評価し、適切なメンテナンス計画を立案することが重要。

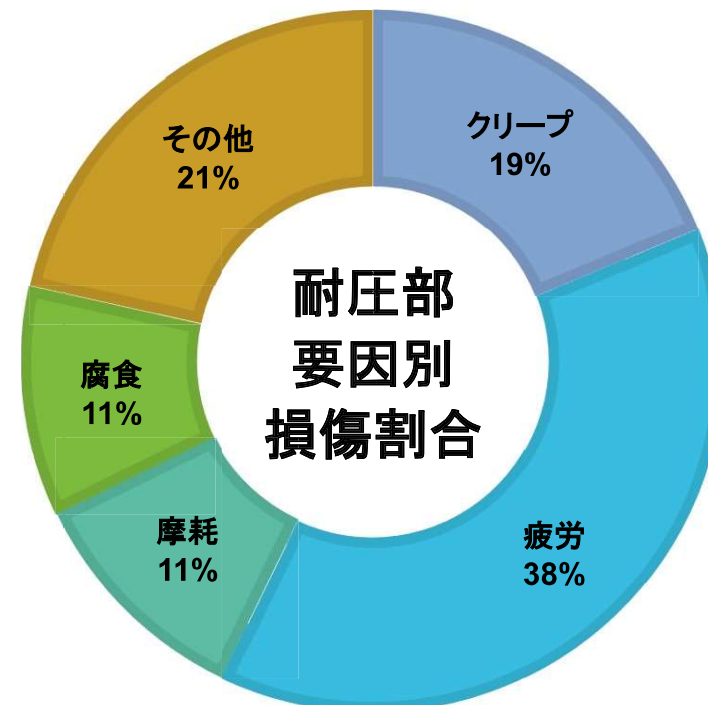
部位別

2022年12月31日現在



要因別(耐圧部)

2022年12月31日現在



2.ボイラ保守運転支援システム(MEDICUS NAVI)

- 2.1 MEDICUS NAVI概要
- 2.2 遠隔監視・異常診断システム
- 2.3 ボイラカルテ
- 2.4 保守高度化機能
- 2.5 運転支援システム(AI)



MEDICUS NAVI

2.1 MEDICUS NAVI概要

～お客様の「想い」を叶えるソリューションを目指して～

様々な課題に対して「ボイラメーカーとして最大限のサポートをしたい」という想いから、お客様とIHIをつなぐ運転・保守支援システムとして『MEDICUS NAVI』を開発。

これまでの開発の成果として

国内電力会社に協力いただき、以下をを共同開発・納入した。

- ・ 保守高度化機能
- ・ M-NAVIの基本機能
- ・ AIによるボイラー燃焼調整最適化支援システム

また、海外電力会社と、石炭焚火力発電所において、IoTを活用した火力発電所向け遠隔監視サービスの実証試験を完了し、予定通りの結果を確認した。

お客様とともに、膨大な運用データや設備メンテナンスデータを共有し、最適なソリューションと一緒に考えていけるツールとして『MEDICUS NAVI』の開発を行う。

【名前の由来】

ボイラの医者(ラテン語：Medicus)として、お客様に寄り添い、お客様課題解決までの道のりを案内(英語：Navigation)するシステム。

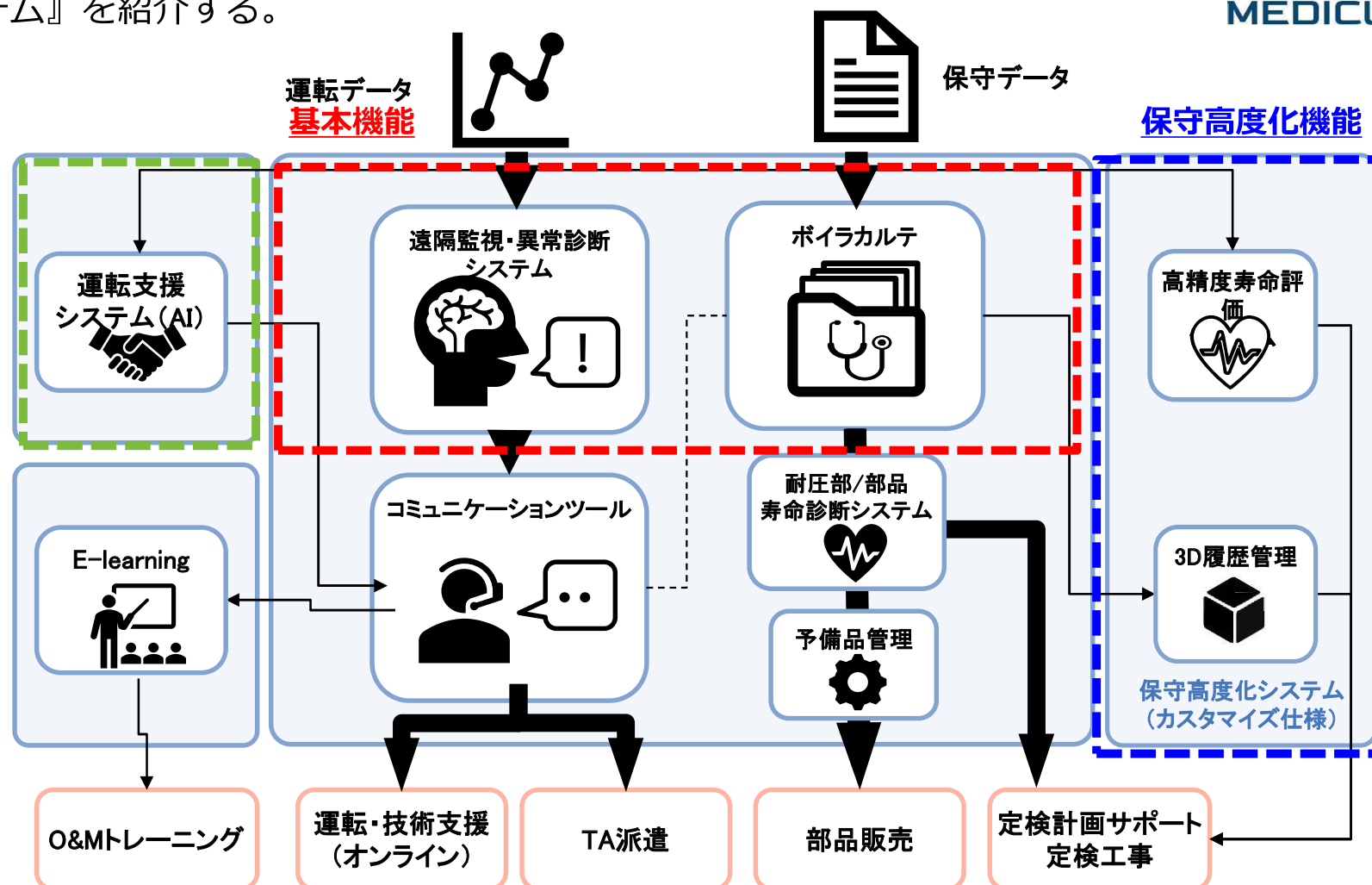
2.1 MEDICUS NAVI概要

システム概念図

MEDICUS NAVIは各種アプリケーションの連携によりシステムが構成されます。
そのうち、以下に示す『基本機能』と『保守高度化機能』および『運転支援シ
ステム』を紹介する。



MEDICUS NAVI

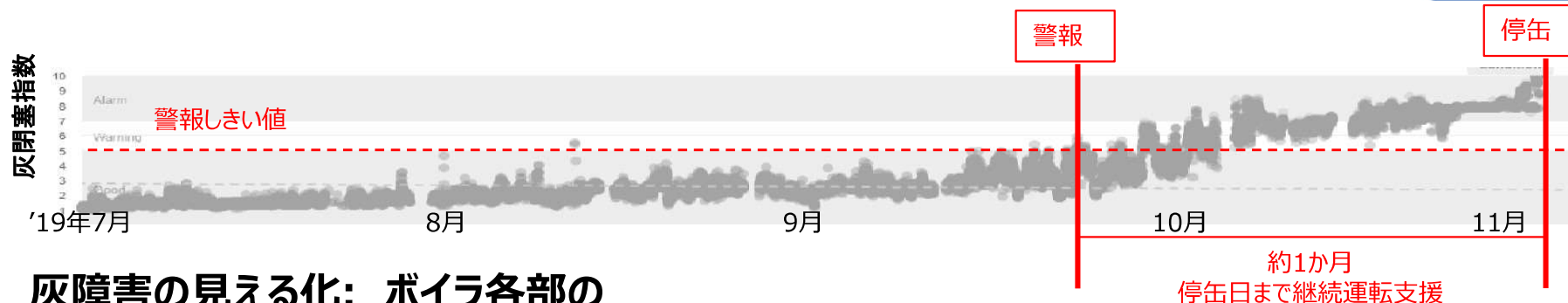


2.2 遠隔監視・異常診断システム

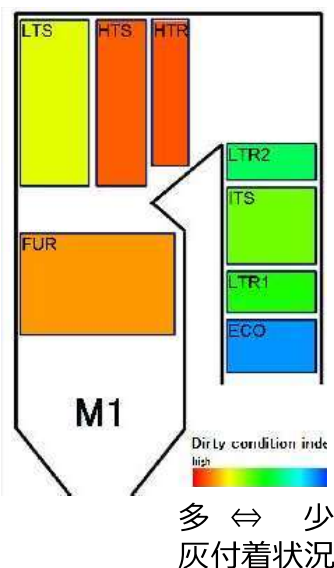
異常診断システム ～ボイラの重度灰閉塞～

ボイラ灰閉塞指数： 収熱状況によるボイラ全体としての灰閉塞指標

遠隔監視・異常診断
システム



灰障害の見える化： ボイラ各部の
灰付着状況のヒートマップ表示



- 本計測から2019年9月下旬から灰閉塞を検知
- 停缶までの期間，運転支援に基づく延命措置
(灰障害見える化に基づく最適 S B 運用等)
- 停缶後観察により，措置の正当性を確認
- 停缶時の補修を事前に計画可能

2.3 ボイラカルテ

点検記録、事故記録、部品補修記録といったメンテナンス情報を一元管理することにより、類似トラブルの再発防止やメンテナンス効率の向上を目的とする。

ボイラカルテ



IHIと情報を共有

点検図面やメンテナンス計画/記録を準備し、有意義な情報を一元管理できるようサポート

ボイラメーカーとしての知見より、より良いメンテナンス計画をご提案

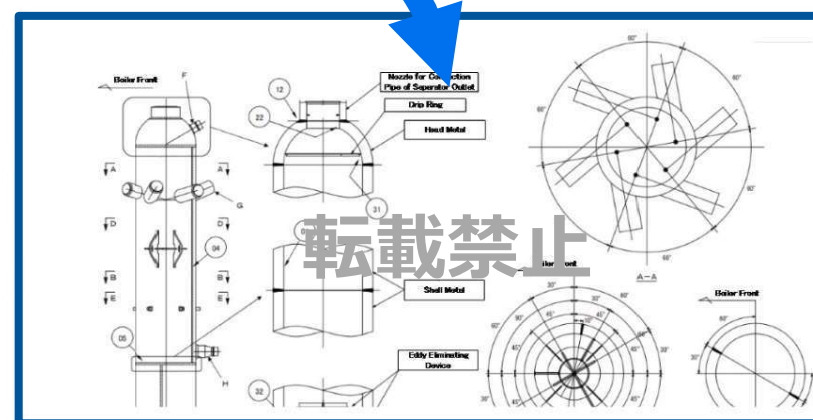


メンテナンス情報の一元管理

ボイラカルテTop画面

Inspection Schedule															Inspection Guide		Remarks		
Inspection Points (NO.)	Inspection Area	Point Code	Design Press. (MPa)	Temp. (degC)	Material	Out. Diameter (mm)	Thickness t (mm)	Yr. (mm)	No. of Parts	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2027		Inspection Period	Inspection Method
Yanta Memo	Inspection Point																	Each Periodical Inspection	RIE Guidelines
1 Superheater	Shell Inner Face																		
	1-Shell Base Metal Inner Face	1-01	29.2	429.0	SA302HC	746	74	2/ave t			O					O			
	2-Head Base Metal Inner Face (Horizontal Part with Shell)	1-02	29.2	429.0	SA302HC	746	74	4/ave t			O					O			
	3-Head for Steamator Drain Tank Heat Pipe And Connecting Pipe Inner Face	1-03	29.2	429.0	SA302HC	746	74	4/ave t			O					O			

メンテナンス記録(保守履歴管理表)



点検図面

2.3 ボイラカルテ

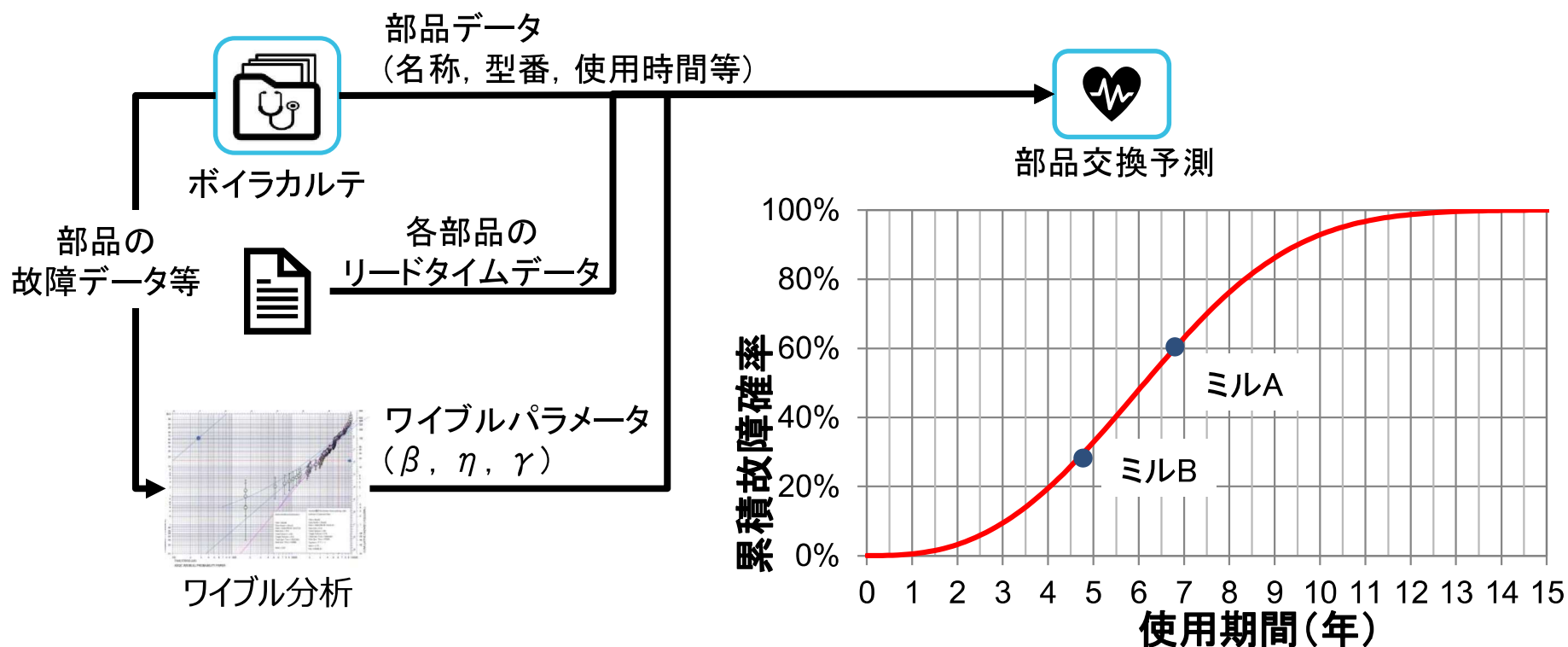
メンテナンス情報の活用例

ボイラカルテ



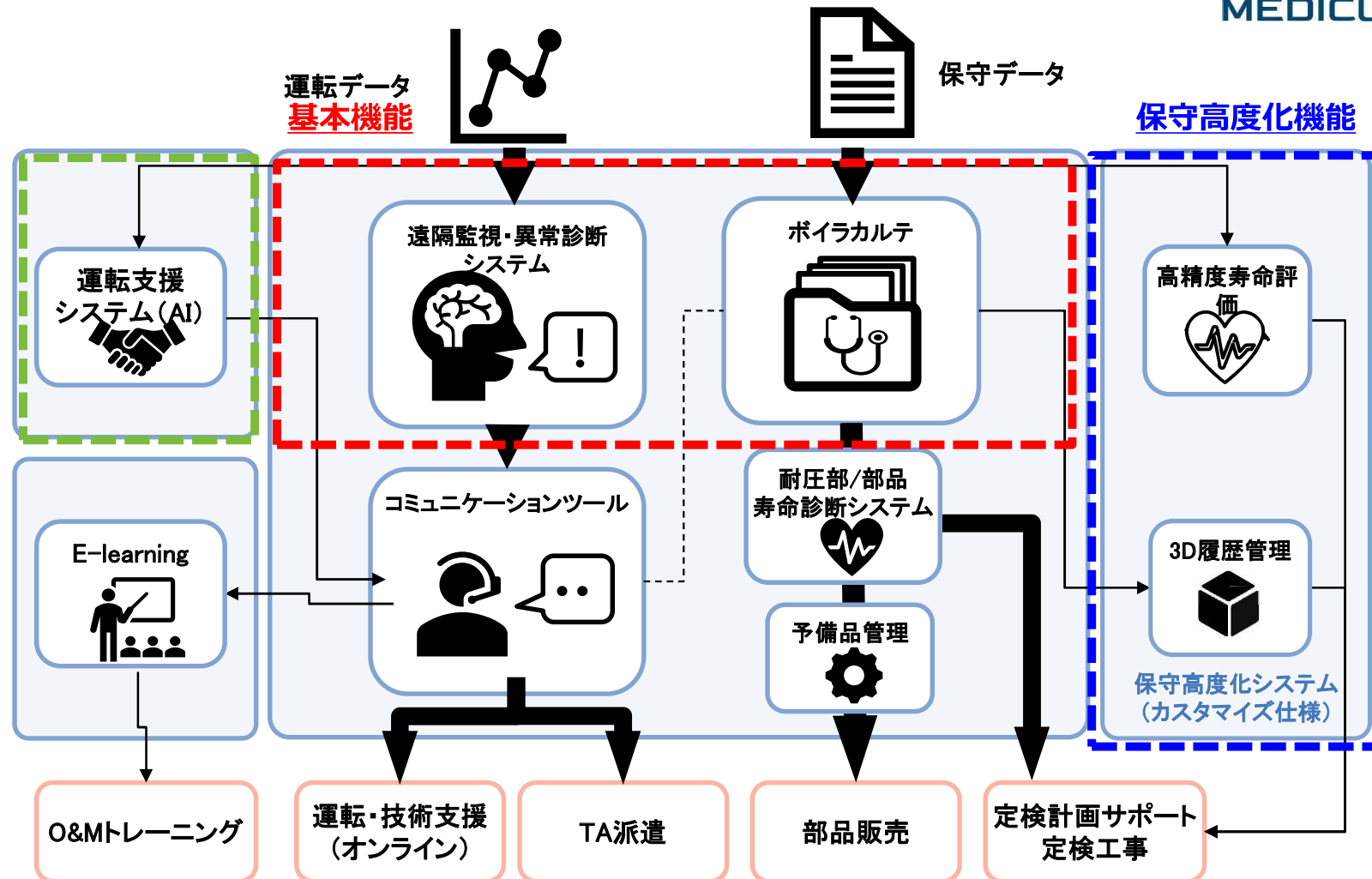
故障データを活用した部品交換予測

MEDICUS NAVIのアプリケーションの一つに、“耐圧部/部品寿命診断システム”がある。ここでは、ボイラカルテに蓄積された故障データに対し、ワイブル解析における信頼性評価関数を求めることで当該部品の累積故障確率を計算・表示する。



2.4 保守高度化機能

システム概念図



2.4 保守高度化機能

保守高度化システムの目的

ボイラの運転監視と寿命評価の精度向上ならびに保守計画の最適化・省力化を図るために ボイラ保守高度化システム を開発

高精度寿命評価
システム



1. 運転監視の精度向上

ボイラの温度分布の把握精度向上を図るとともに、運転データ等を基に、これまで把握できなかった箇所の温度を補間のうえ、3D表示
→ボイラの運転状態を直観的に認識可能。

2. 寿命評価の精度向上

1. により得られる詳細な温度データのほか、ボイラの構造データや圧力、蒸気温度などの各種運転データを用いて、ボイラ管 1 本 1 本に加わる熱や力（応力）を解析することにより、管の寿命評価の精度向上を実現
→不具合が発生する可能性が高い箇所を予測可能。

3D履歴管理



3. 保守計画の最適化・省力化

従来、過去の膨大な保守履歴の確認作業に多大な時間と労力が必要
過去の検査・修繕実績、不具合履歴をデータベース化し、保守計画業務の省力化を実現。
→蓄積したデータを、ボイラの3D画像で色分けして表示し、保守すべき箇所を抜け漏れなく容易に把握可能。

保守高度化システム
(カスタマイズ仕様)



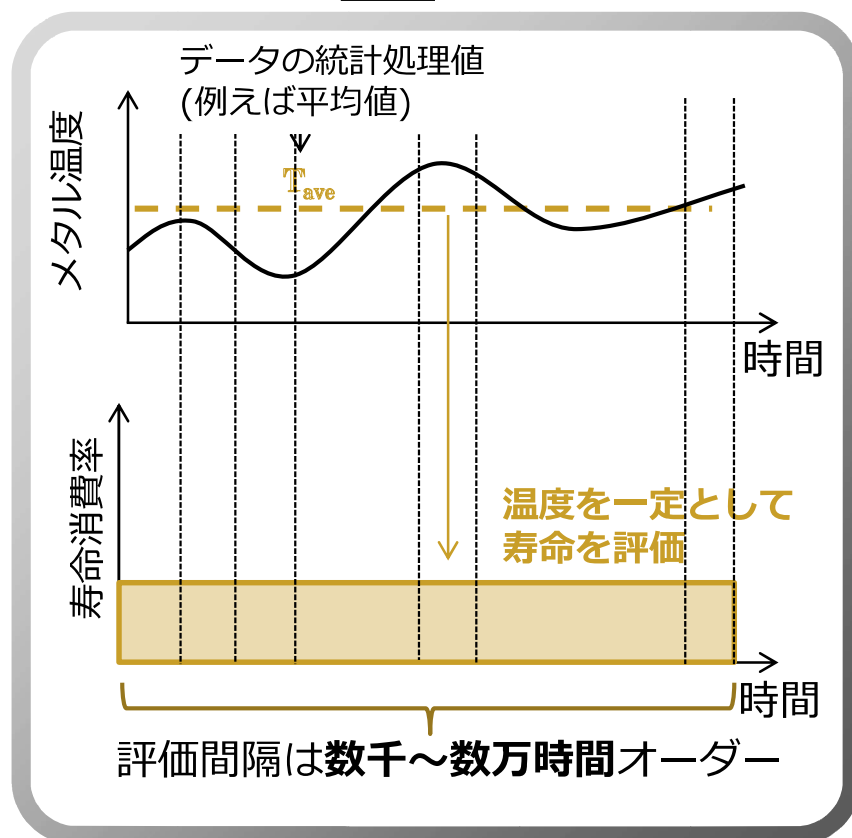
2.4 保守高度化機能

高精度寿命評価システム(1/3)

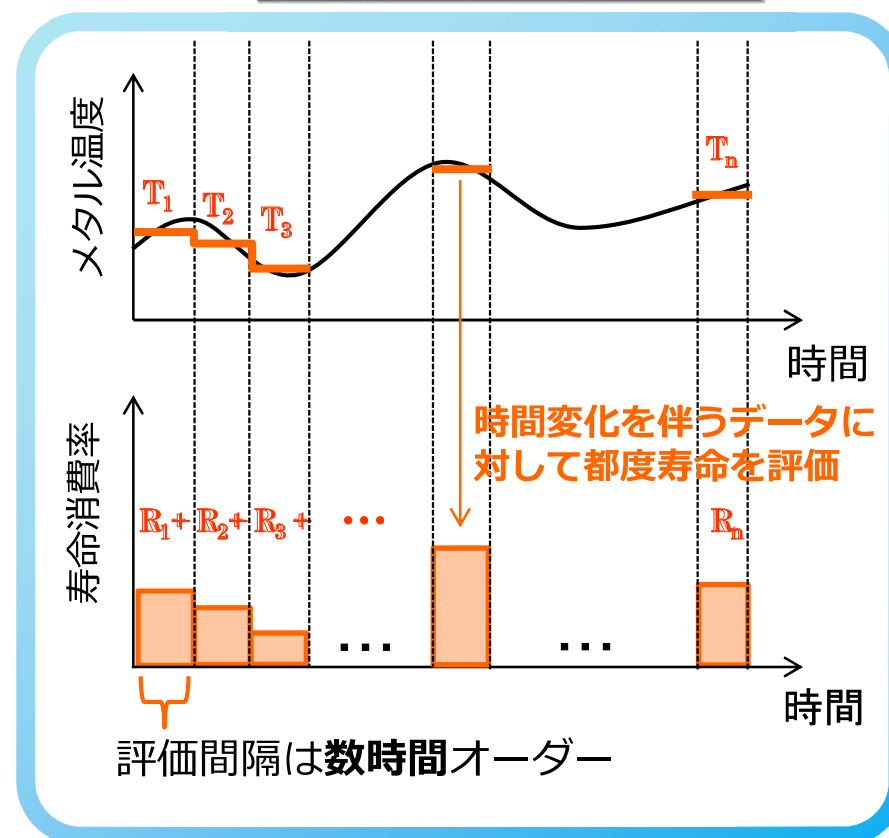
＜寿命消費率の累積について＞

従来の方法に比べ、高精度寿命評価システムでは時間変化する温度/圧力等の運転データに対し細かい間隔で寿命を評価。

従来



高精度寿命評価システム



⇒予測精度の向上に伴い、補修計画の最適化にも期待

2.4 保守高度化機能

3D履歴管理システム概要

蓄積した保守履歴データについて、データベース化し検索が簡素化

保守履歴の管理が容易となり、保守計画の最適化・省力化が可能

3D履歷管理



①ボイラー部位別保守結果を登録

[illegible]

②保守履歴管理表

富原厚真発電所 第4号ボイラ

ボイラ耐圧部 保守管理表

記号説明

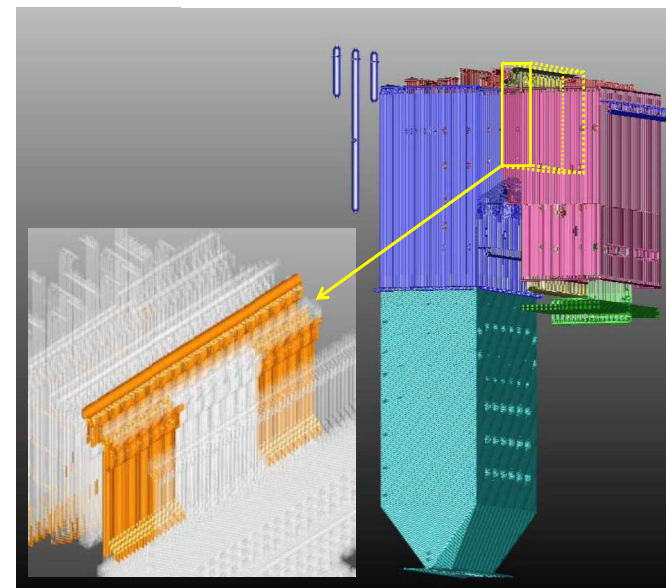
部材割(全体) 点検箇所(全体)
耐圧部(一部) 点検箇所(一部)
点検(異常なし) 点検(異常あり、一部補修)
点検(正常) ▲トラブル

水: 水平線間

耐圧(正常・全体)
耐圧(一部)

設備ID		No.	点検箇所	部材	設計仕様	材質	外径	厚さ	長さ	kg	設計	保守管理スケジュール(年度)												検査内容		備考																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
機器名			点検内容									14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368	1369	1370	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410	1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419	1420	1421	1422	1423	1424	1425	1426	1427	1428	1429	1430	1431	1432	1433	1434	1435	1436	1437	1438	1439	1440	1441	1442	1443	1444	1445	1446	1447	1448	1449	1450	1451	1452	1453	1454	1455	1456	1457	1458	1459	1460	1461	1462	1463	1464	1465	1466	1467	1468	1469	1470	1471	1472	1473	14

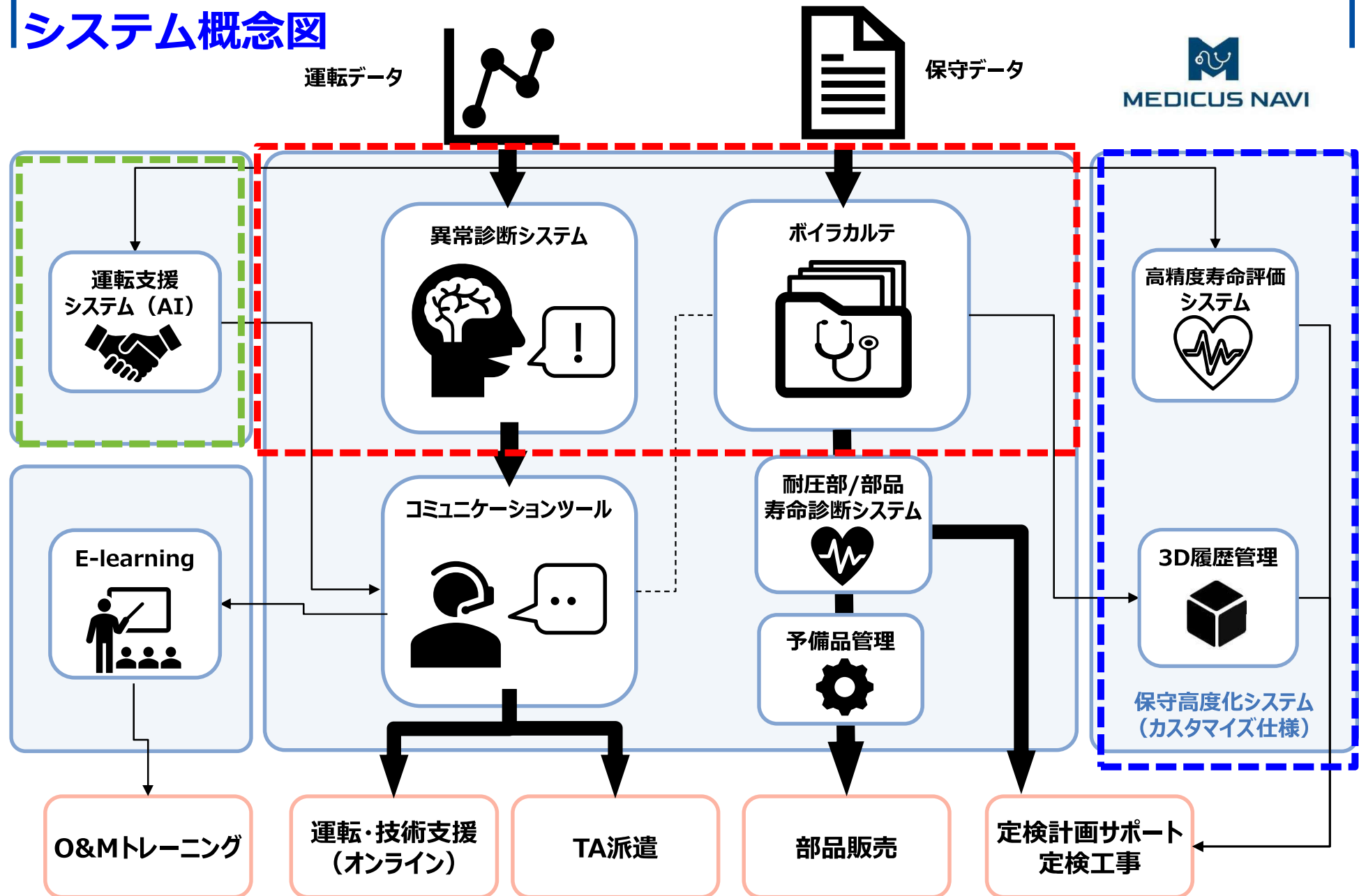
③ 3Dによる保守履歴



①ボイラーの部位別に保守結果を登録し、
②保守履歴管理表または③ 3 D表示により
保守履歴（色分けによりわかり易く表示）
が確認できます。
これにより、効率的なボイラーの保守管理
を可能とします。

2.5 運転支援システム(AI)

システム概念図



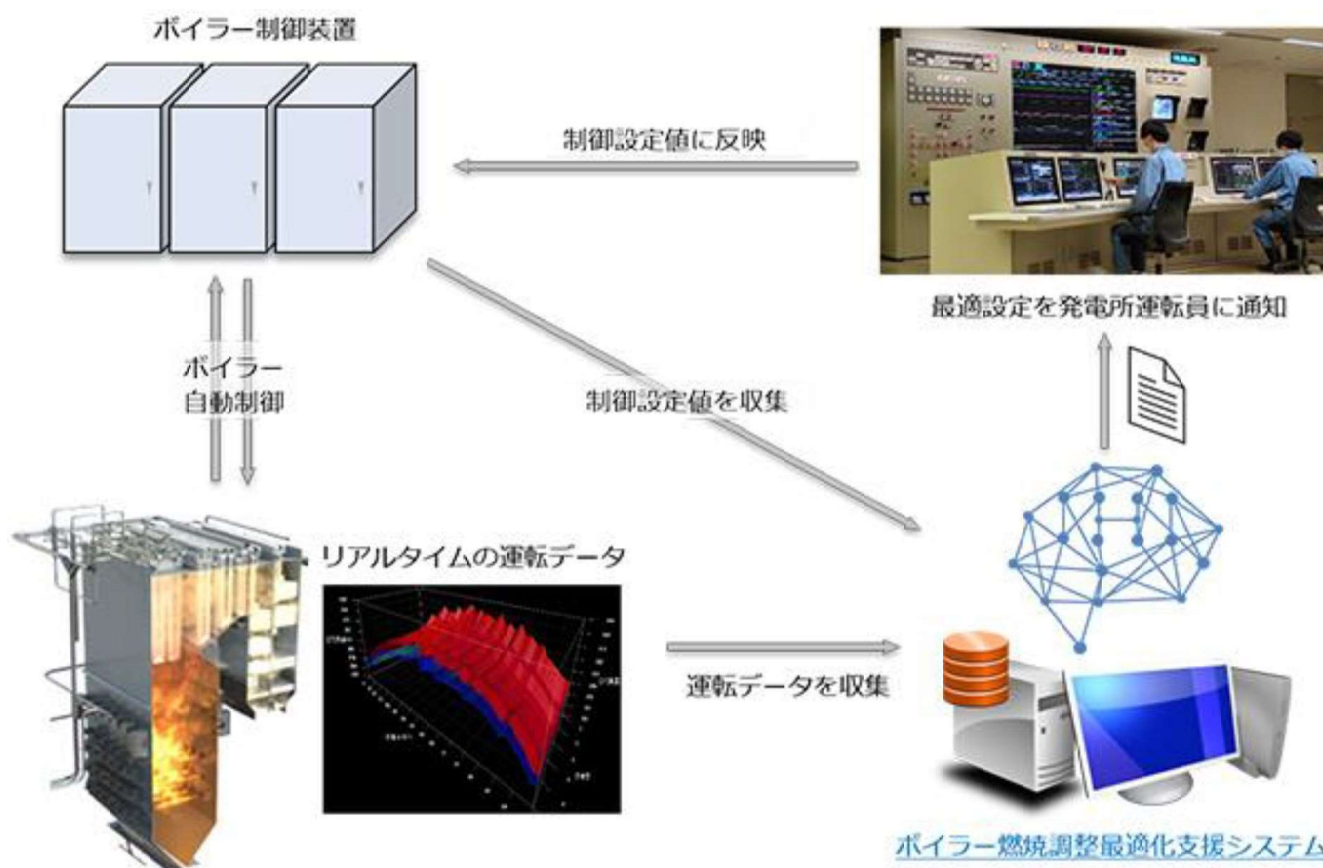


2.5 運転支援システム (AI)

AI活用による運転最適化

ボイラ燃焼調整最適化支援システム

国内電力会社とAIによるボイラ燃焼調整最適化支援システムを共同開発し、運用を開始



リアルタイムのボイラ運転データ



差異をAIが自動解析し、
燃焼調整に最適な設定
を発電所運転員へ通知
するシステム

最適な燃焼状態のモデルデータ



発電所運転員により日常的に
ボイラ燃焼調整実施可能



期待する効果

- ・ボイラ効率の経時的な低下を抑制
- ・ボイラ関連機器運転コスト低減
- ・ボイラ寿命消費の低減

AIを活用したボイラ燃焼調整最適化支援システムの概要

3. ボイラ点検補修における新技術導入

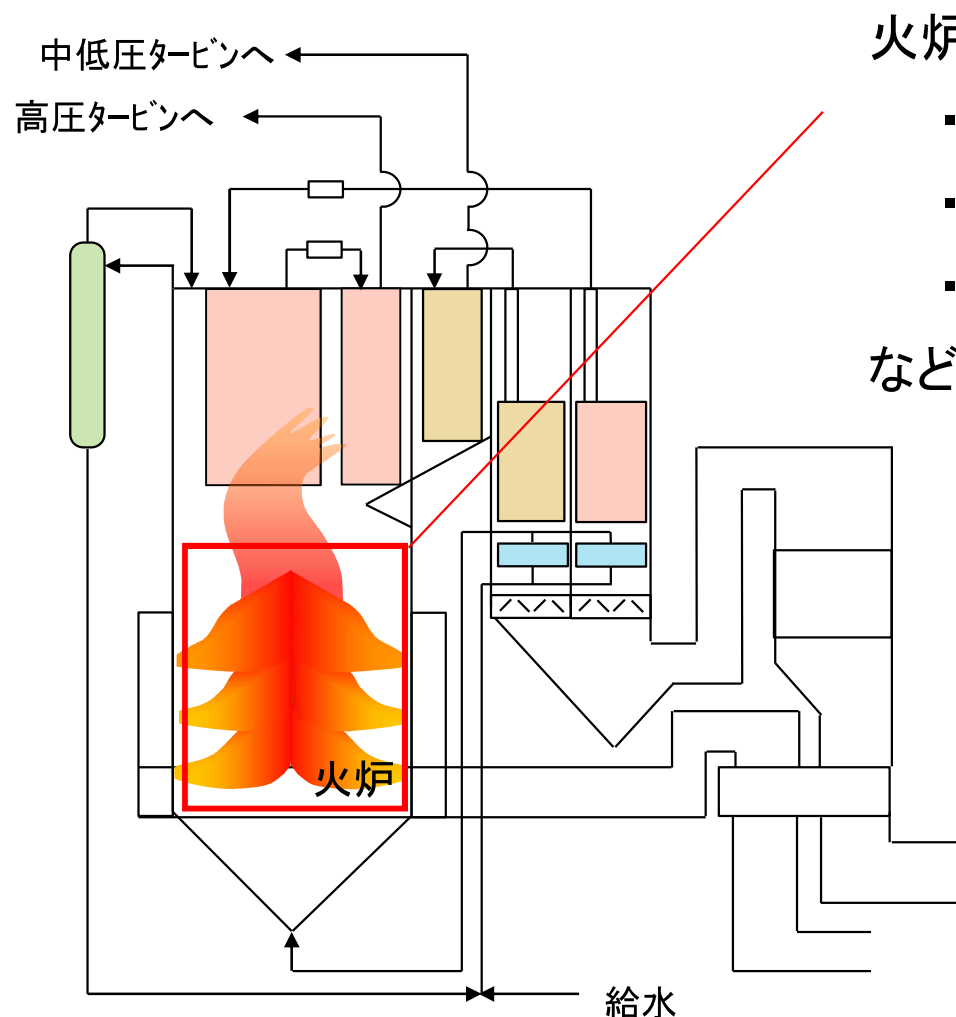
3.1 渦電流探傷によるファイアクラック検査技術

3.2 オーステナイト系ステンレス鋼の寿命評価

3.1 渦電流探傷(ET)によるファイアクラック検査技術

3.1.1 背景

火炉壁管における劣化・損傷



火炉壁管においては、

- ファイアクラック
- 硫化腐食
- 摩耗(エロージョン)

などにより劣化・損傷が生じる可能性がある

[火炉の環境]

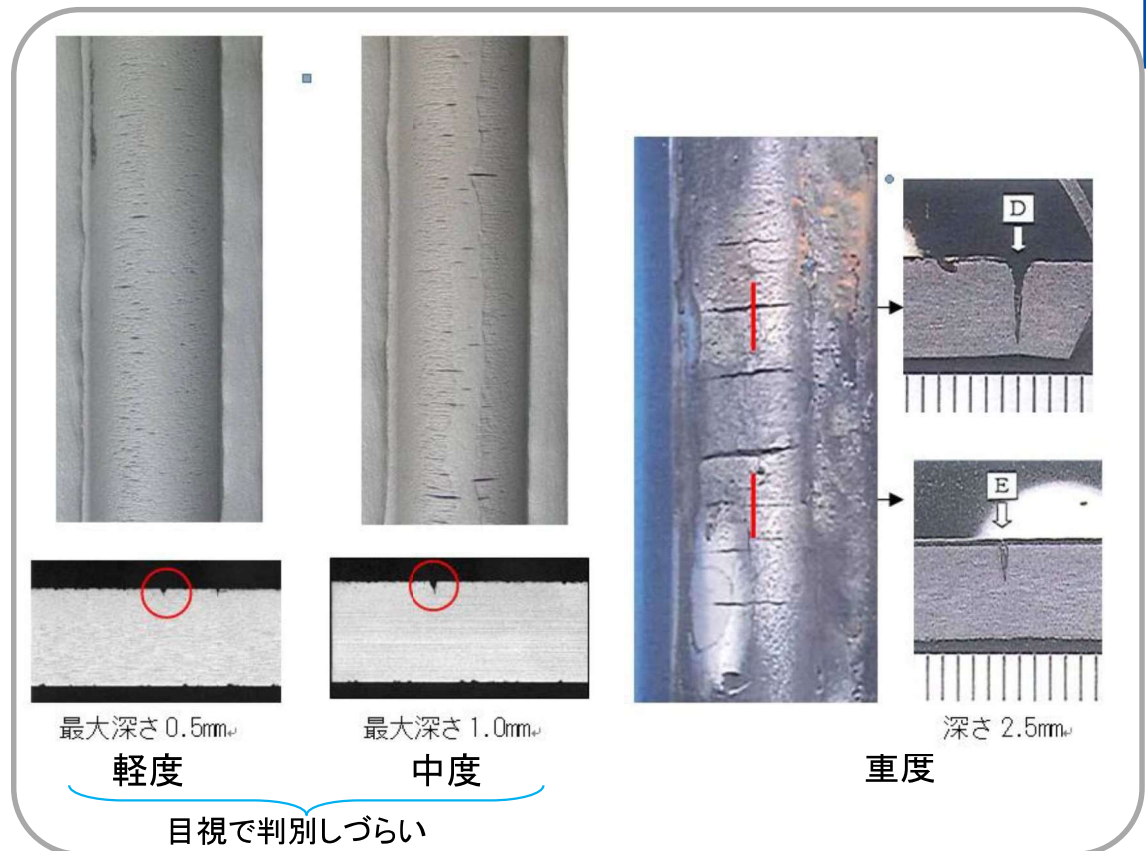
- 還元性の腐食環境
- 火炎ゆらぎによる熱応力
- 燃焼灰・蒸気による摩耗環境
(ウォールデスラガ近傍など)

火炉壁管の劣化状況の把握・管理が重要となる

3.1.1 背景

ファイアクラック(エレファントスキン)は、
熱 / 繰返し応力 / 腐食環境
の3つの要素が重畳して発生するき裂

通常はブラストにより灰／スケールを
除去したのちに目視点検を実施する



目視による火炉壁管点検の課題

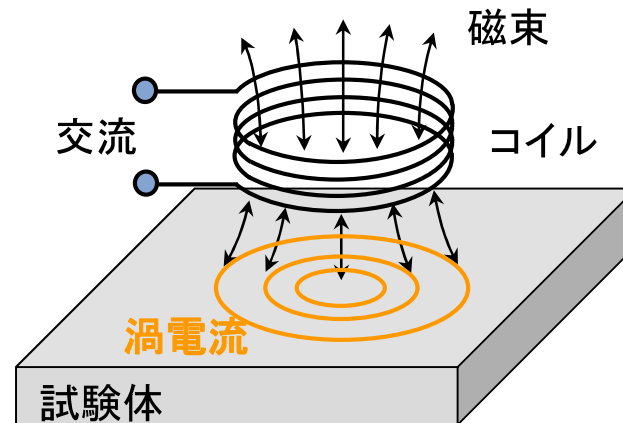
- ・ 灰・クリンカ・スケール除去のためのブラストが必須
- ・ ファイアクラックの目視の評価と深さは必ずしも一致しない

渦電流探傷試験 (Eddy current Testing: ET) のプローブ・探傷条件の適正化により
灰・スケールを除去することなくファイアクラックを評価できる スクリーニング検査手法を開発

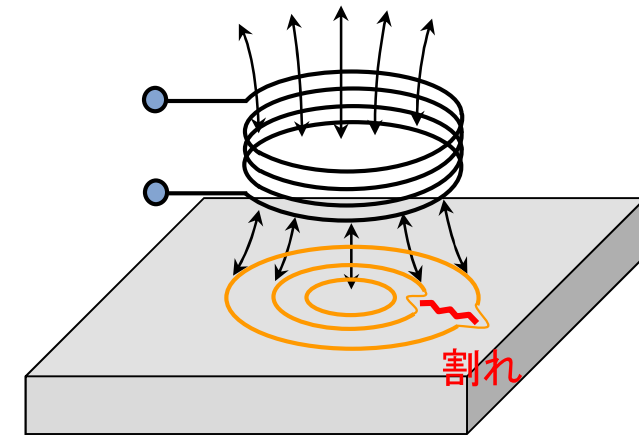
3.1.2 機器構成・プローブ

ET(Eddy current Testing: 渦電流探傷)の原理

誘導電流により
表層に渦電流が流れる
↓
き裂により
渦電流が乱れる
↓
渦電流から発生する
磁束が変化する
↓
磁束の変化を
コイルなどで検出する



健全面における渦電流

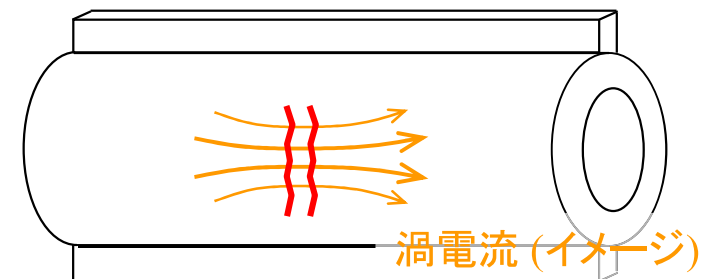


き裂部における渦電流

灰・スケール上から検査が可能
(コイルと試験体が離れていてもき裂を検出できる)

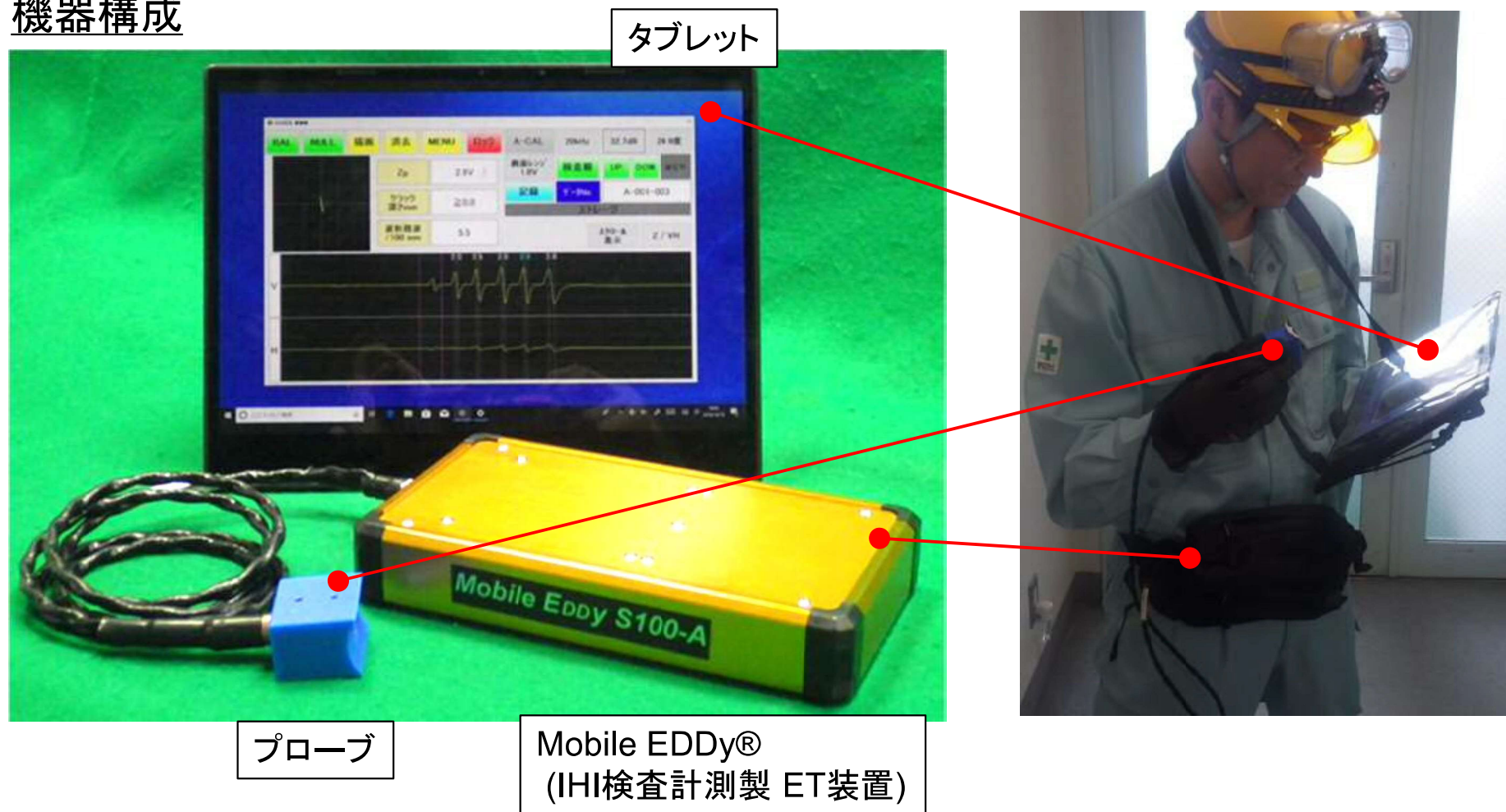
プローブ検討において留意した事項

- ・ 渦電流が軸方向に多く流れるようにコイルを配置
(ファイアクラックの検出性を高めるため)
- ・ リフトオフに影響されにくいような検出コイルを設計
 ↳ 探傷面とプローブの間隔
 (フェライト径, 長さ, コイル巻き数など)
- ・ 磁性のノイズの影響を軽減したコイル設計
 ⇒ 探傷装置側で周波数フィルターが不必要(プローブの走査速度が変動しても信号強度が変動しない)



3.1.2 機器構成・プローブ

機器構成



特徴

ポータブルな装置

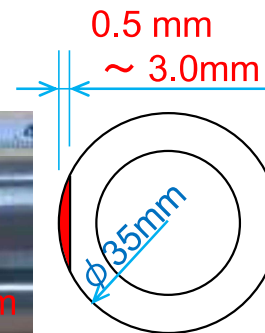
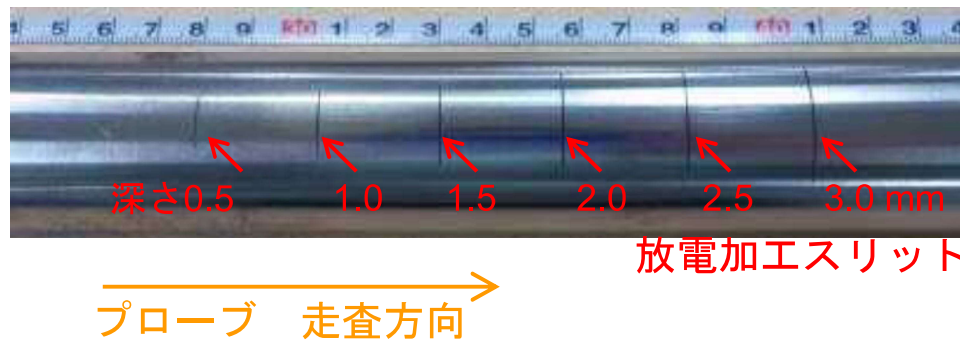
走査しやすいプローブ

探傷ノイズの低減

3.1.3 きず導入試験体での検証

人工きず試験体による検証

人工きず(放電加工スリット)を用いて
きず検出性を検証

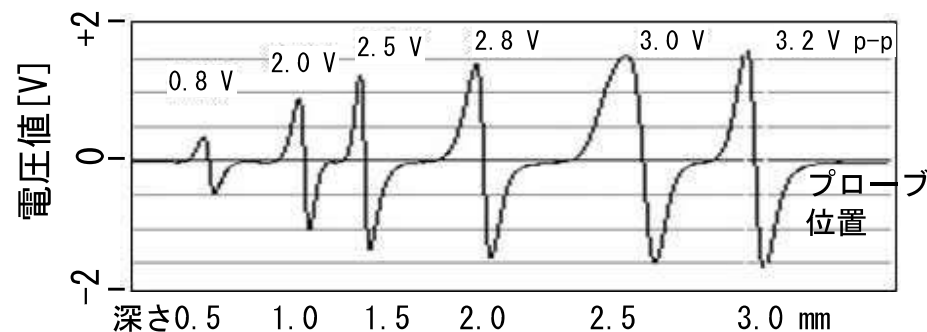


管頂部にプローブを当てて、
軸方向に走査する



探傷状況

試験結果



- それぞれのスリットにおいて、信号が出現。
- 深さに応じて振幅が増加
(特に0.5 mm ~ 2.0 mm
にて振幅変化が大きい)

3.1.4 火炉壁管メンテナンスへの適用について

開発技術による火炉壁管 検査フロー(案)

- ① 探傷範囲を選定
- ↓
- ② 開発技術による火炉壁管スクリーニング検査を実施
- ↓
- ③ 検査結果をもとに、
代表箇所肉厚測定を実施
- ③' 研削によるクラック深さ確認を実施
(必要に応じて)
- ↓
- ④ 修理時期・方法 /
経年管理についてご提案

従来の火炉壁管ファイアクラック検査

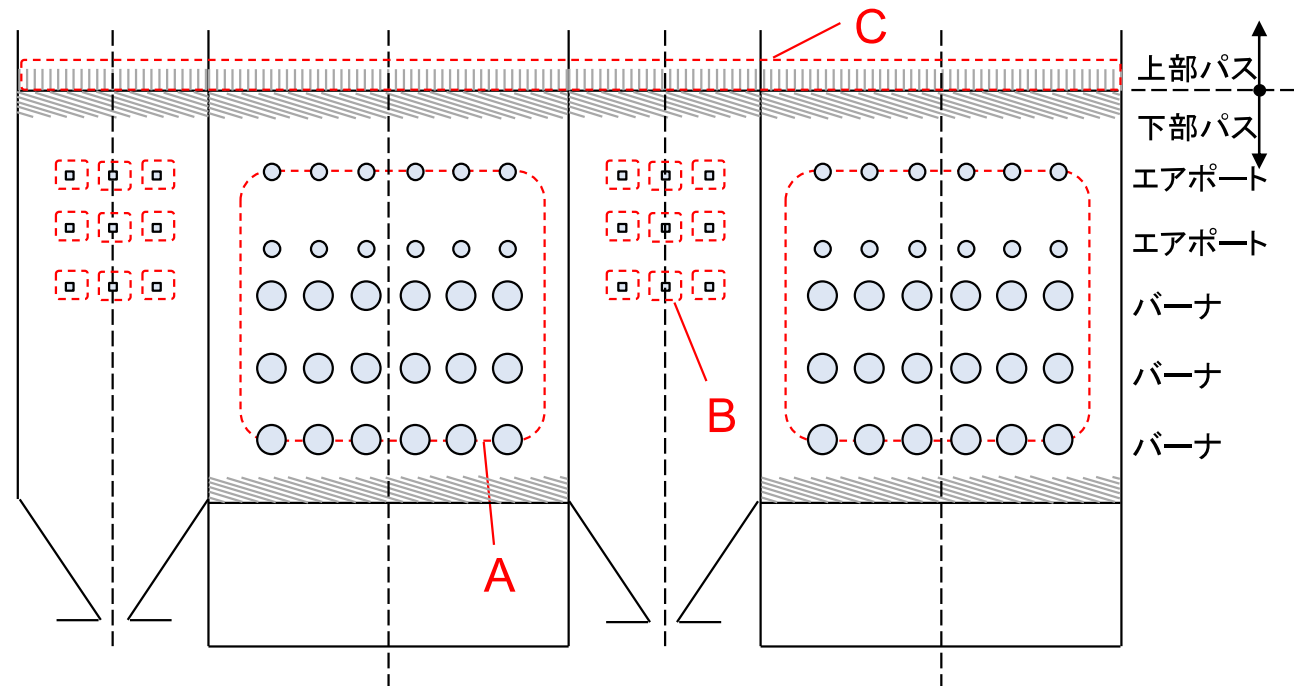
- 探傷範囲の選定
- ↓
- 点検範囲のブラストによる
灰・スケールの除去
- ↓
- ファイアクラックの目視による定性評価
- ↓
- 代表箇所の研削によるクラック深さ確認
- ↓
- 修理時期・方法について協議

**工期の短縮化／クラック深さの半定量化により、
火炉壁管の保守管理に大きく貢献できる**

3.1.4 火炉壁管メンテナンスへの適用について

火炉壁管 検査フロー

- ① 探傷範囲を選定
- ② 開発技術による火炉壁管スクリーニング検査を実施
- ③ 検査結果をもとに、代表箇所の肉厚測定を実施
- ③' 研削によるクラック深さ確認(必要に応じて)
- ④ 修理時期・方法 / 経年管理について ご提案



火炉展開図(炉内視)

ファイアクラックが生じやすい箇所

A: バーナ / エアポート 近傍

B: ウォールデスラガ近傍

C: 火炉壁管 上部パス(下部)

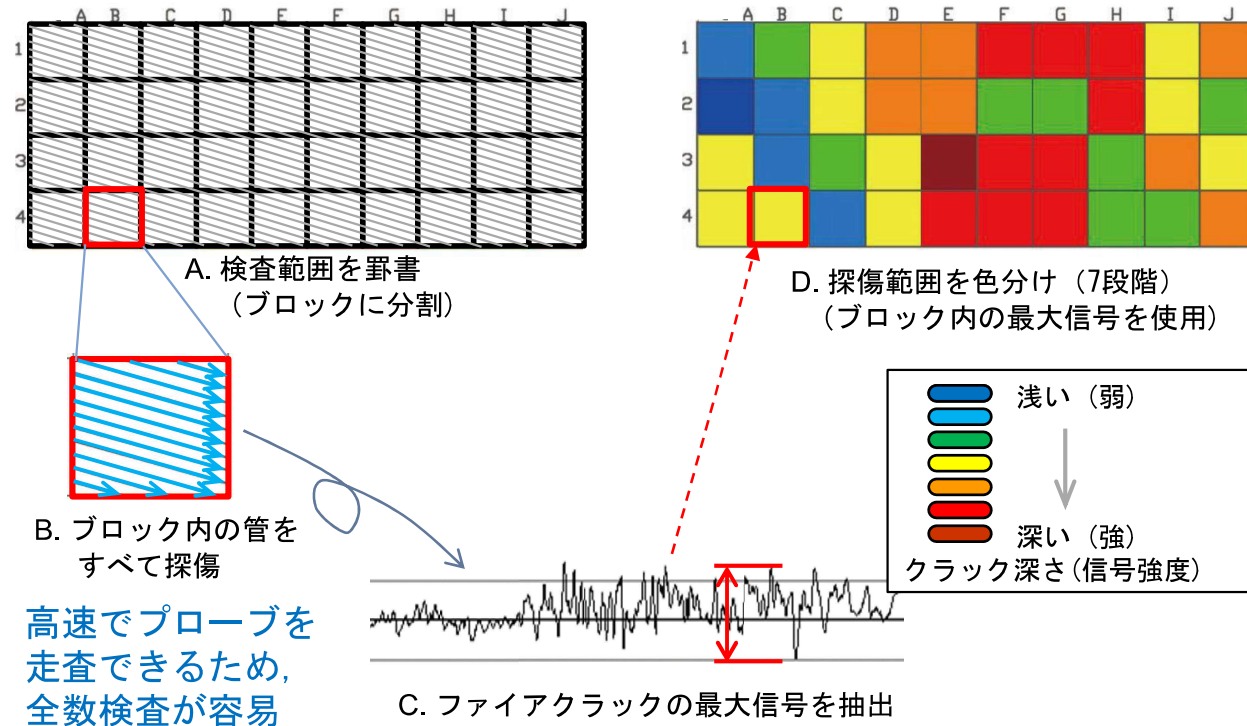
など

ボイラの状況／過去の調査結果を踏まえて
検査すべき箇所を協議・選定する

3.1.4 火炉壁管メンテナンスへの適用について

火炉壁管 検査フロー

- ① 探傷範囲を選定
- ② 開発技術による火炉壁管スクリーニング検査を実施
- ③ 検査結果をもとに、代表箇所の肉厚測定を実施
- ③' 研削によるクラック深さ確認 (必要に応じて)
- ④ 修理時期・方法 / 経年管理について ご提案



検査範囲の全数検査により、
重大なファイアクラックを見逃さない

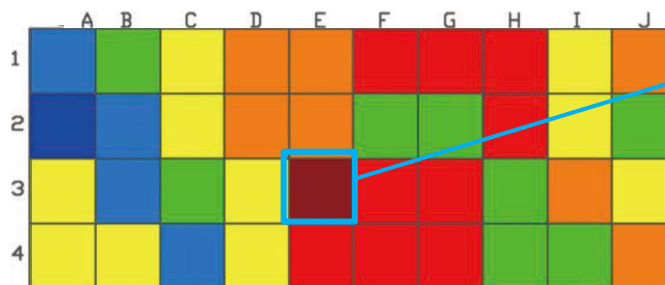
マッピングによる管理ポイントの明瞭化

3.1.4 火炉壁管メンテナンスへの適用について

火炉壁管 検査フロー

- ① 探傷範囲を選定
- ② 開発技術による火炉壁管スクリーニング検査を実施
- ③ 検査結果をもとに、
代表箇所肉厚測定を実施
- ③' 研削によるクラック深さ確認
(必要に応じて)
- ④ 修理時期・方法 /
経年管理について ご提案

代表箇所の肉厚測定

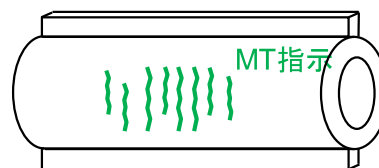


ET信号マッピング結果

クラックの顕著な場所を中心に
灰・スケールを部分的に除去し
肉厚測定を実施する

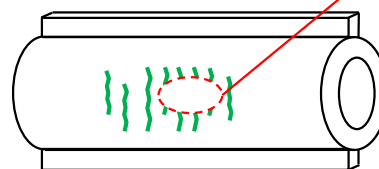
硫化腐食／エロージョン
による減肉状況の確認

クラック深さ確認



研削除去前

管頂部の一部を、MT(磁粉探傷)で確認しながら
研削を実施



除去後

初回のET検査では、
結果の整合性の確認のため
実施しておくことが望ましい

3.1.4 火炉壁管メンテナンスへの適用について

火炉壁管 検査フロー

- ① 探傷範囲を選定
- ② 開発技術による火炉壁管スクリーニング検査を実施
- ③ 検査結果をもとに、代表箇所の肉厚測定を実施
- ③' 研削によるクラック深さ確認(必要に応じて)
- ④ 修理時期・方法 / 経年管理についてご提案

ETマッピング結果, 肉厚測定結果およびクラック深さをもとに,
補修・管理についてご提案

リーズナブルな保守管理の提案

補修

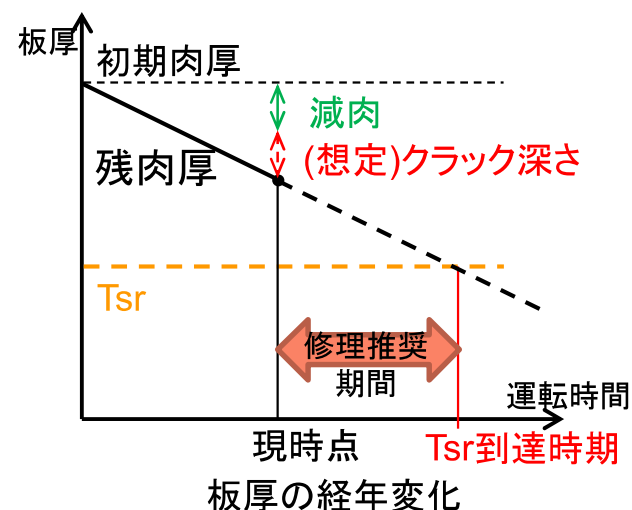
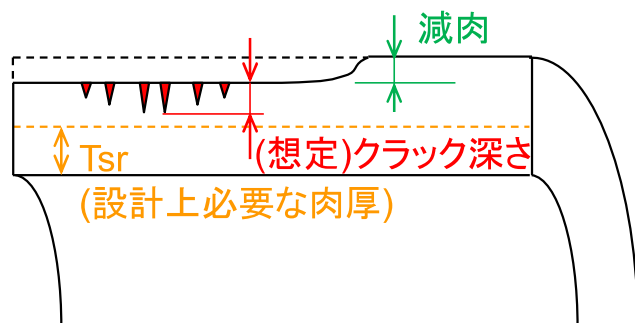
適切な修理時期を選定

- ・ 肉盛溶接 (応急 / 部分処置)
- ・ インコネル肉盛管 / 溶射管への取替

管理

マッピングによる管理ポイントの明瞭化

- ・ クラック / 減肉が厳しい箇所の追跡調査

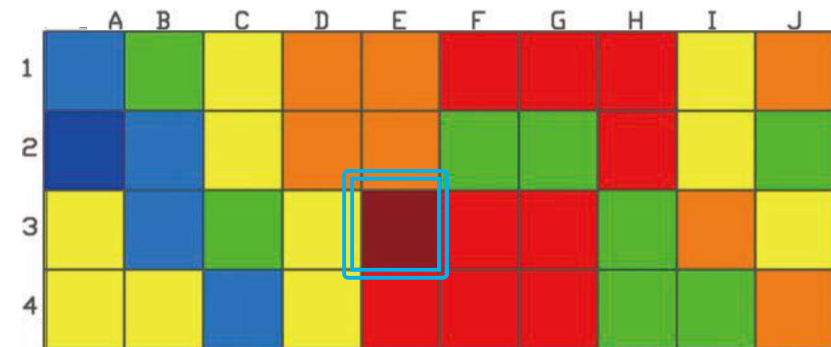


3.1.5 まとめ

本技術を火炉壁管メンテナンスへ用いることのメリット

① リーズナブルな保守管理の提案

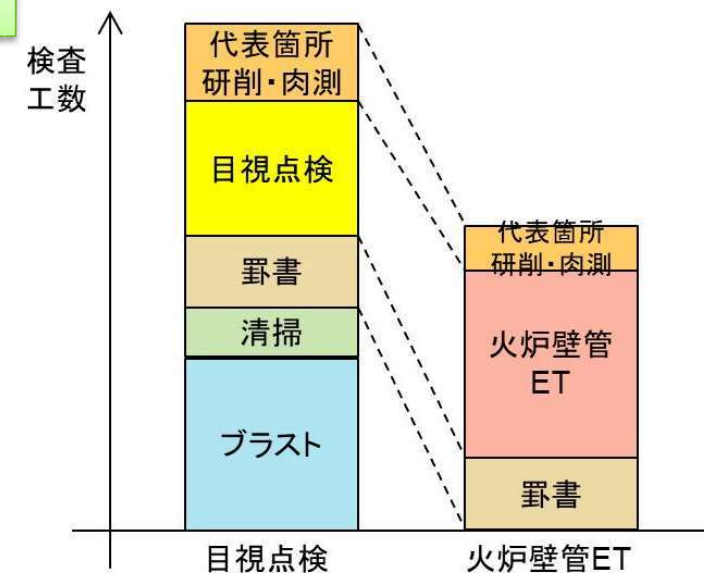
- ・ファイアクラックを半定量的に評価可能となる
監視・補修が必要なファイアクラックを見逃さない
⇒ プラントの安全・安定的な運用へ貢献
- ・マッピングによる管理ポイントの明瞭化



マッピングによって、7段階で分類
修理・監視すべきポイントが分かる

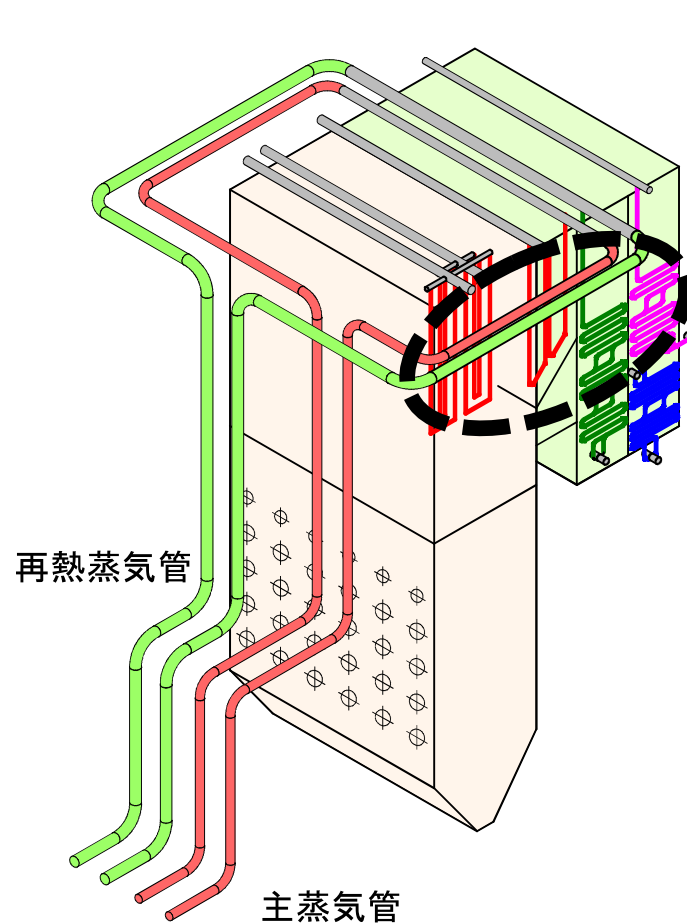
② ブラストなしで検査が可能となる(工期低減)

- ・高速な検査
⇒ 検査範囲の全数検査が可能
- ・ブラスト工数・産業廃棄物の削減
- ・炉内での夜間作業枠の拡大



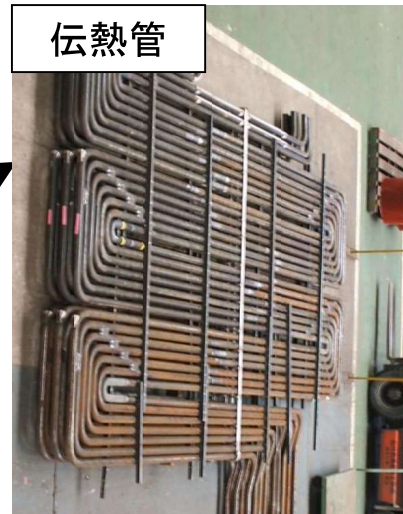
3.2 オーステナイト系ステンレス鋼の寿命評価

3.2.1 はじめに



ステンレス鋼

伝熱管



トラブル事例



Ref. C. Che et al. : Proceedings from the Eighth International Conference (2016) 348

多くのUSCボイラの運転時間は100,000hを超えている

プラントの安全で安定的な運用のために…

⇒ クリープ寿命を高精度に
評価することが重要

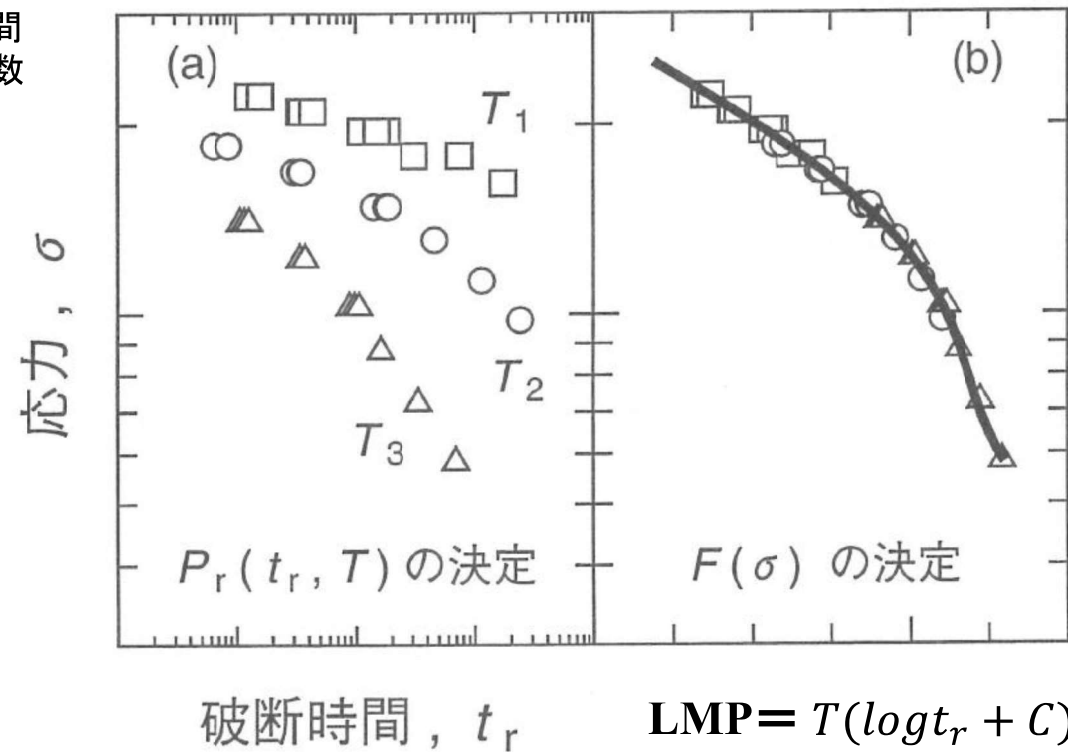
3.2.2 “Larson-Miller-Parameter” によるクリープ寿命評価

Ref. 丸山公一, 中島英治, “高温強度の材料科学

“Larson-Miller-Parameter”

$$T(\log t_r + C) = LMP = F(\sigma)$$

T : 温度
tr : 破断時間
C : 材料定数



3.2.2 “Larson-Miller-Parameter” によるクリープ寿命評価

“Larson-Miller-Parameter”

$$T(\log t_r + C) = LMP = F(\sigma) \implies$$

$$\log(t_r) = \frac{LMP}{T} - C$$

温度？

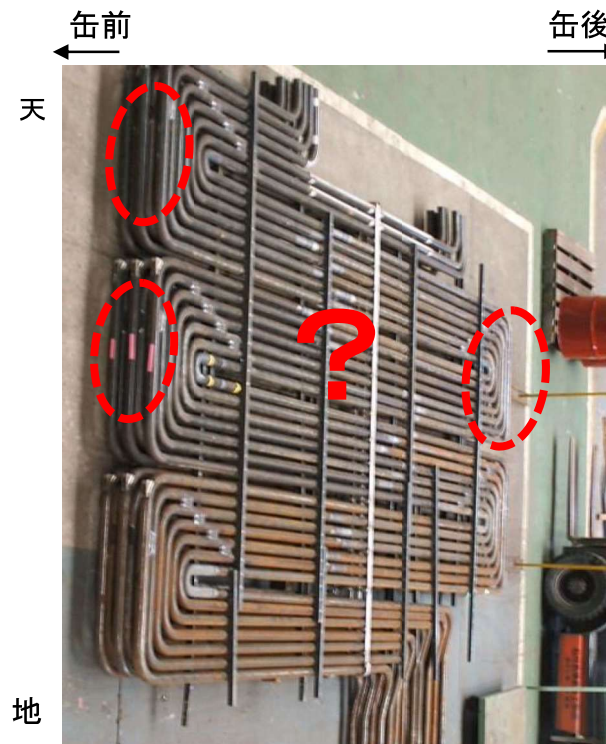
- ・ 伝熱管のメタル温度は各部位で異なる。
- ・ 直接温度を測定することができない。



寿命評価を実施するためには
温度推定手法の確立が必要！！



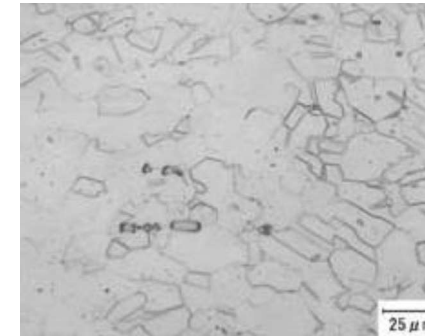
オーステナイト系ステンレス鋼の寿命評価手法の確立を目的に、マイクロ組織変化からメタル温度を推定可能か検討した。



3.2.3 クリープ試験(試験条件)

供試鋼

オーステナイト系ステンレス鋼： 火SUS304J1 HTB
(ASME Code Case 2328)



化学組成 (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	N	Cu	Fe
0.08	0.21	0.82	0.034	<0.001	8.82	18.47	0.49	0.11	3.05	Bal.

クリープ試験

・ 内圧クリープ試験

750°C, 60~100MPa (フープ応力)

・ 単軸クリープ試験 (φ6mm)

700°C, 90~230MPa

750°C, 60~120MPa

組織観察

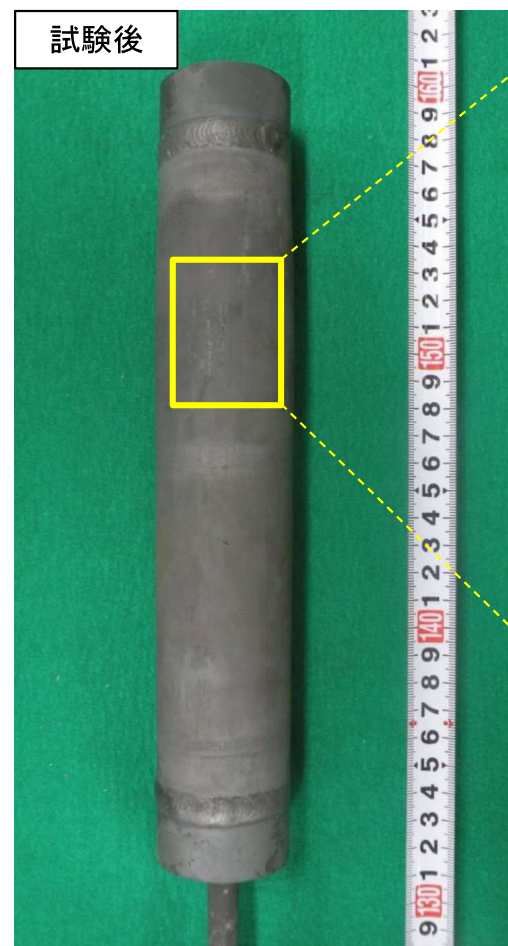
OM,
SEM

σ相粒子径の定量評価

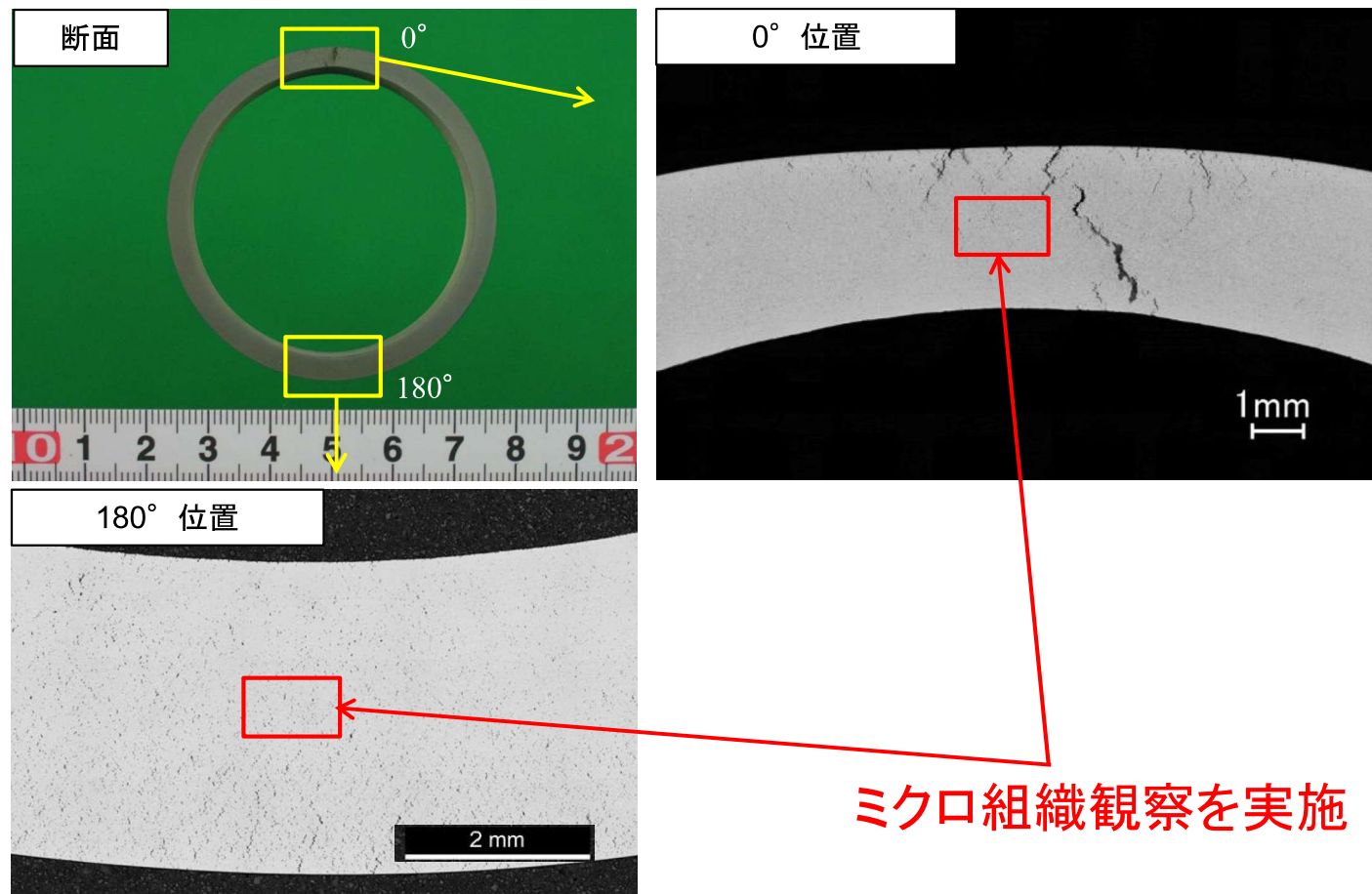
- ・ 1000~2000倍 5視野
- ・ 円相当径として算出.

※for Internal pressure creep tests

3.2.3 クリープ試験(試験体の外観)



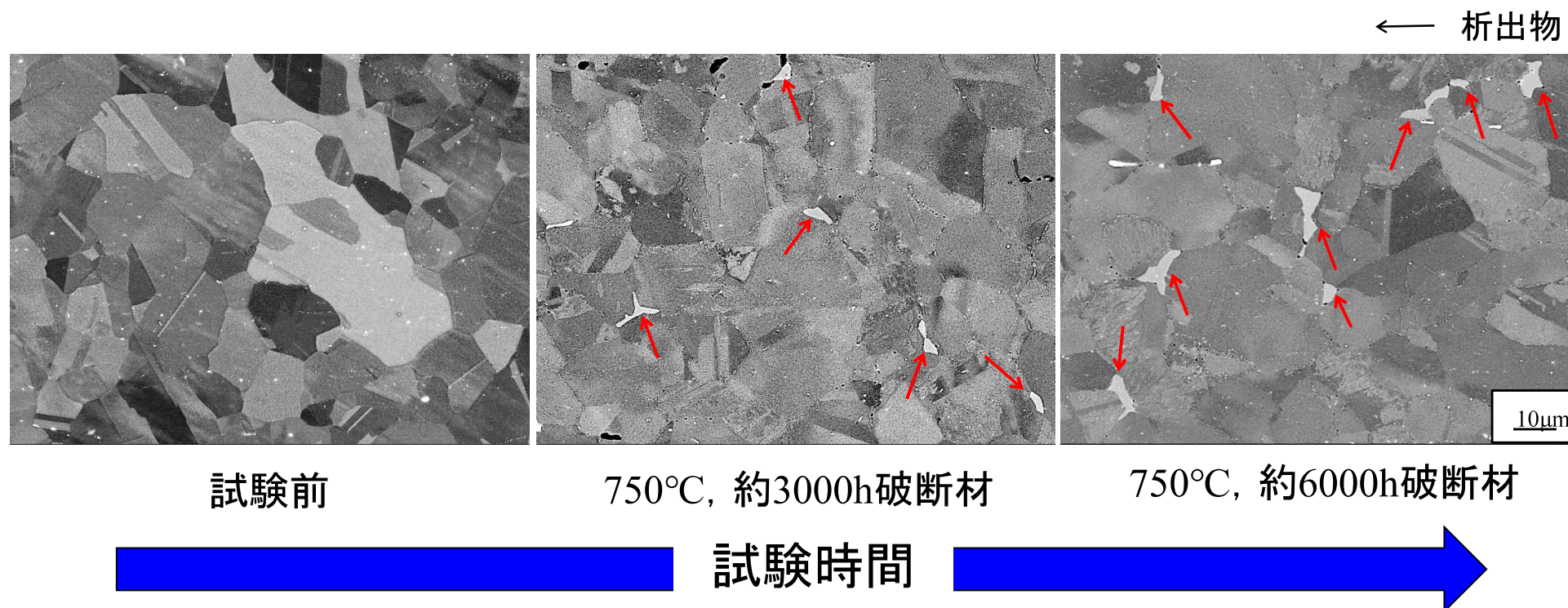
3.2.3 クリープ試験(断面マクロ観察結果)



ミクロ組織観察を実施

3.2.3 クリープ試験(破断材のSEM観察結果)

クリープ環境下におかれたオーステナイト系ステンレス鋼の金属組織には σ 相が析出し、試験時間に伴い粗大化していることが分かった。

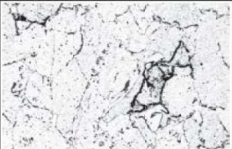
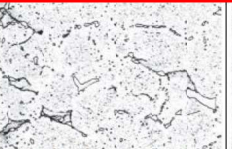
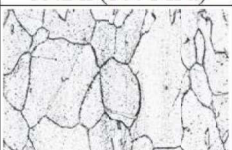
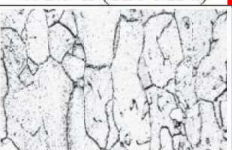
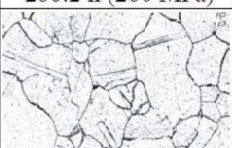
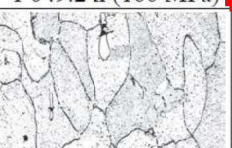
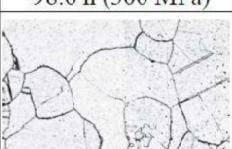
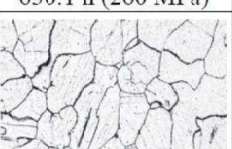
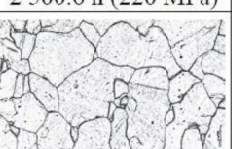
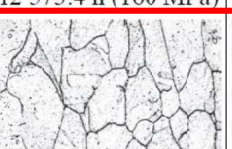


火力原子力発電技術協会「ステンレス鋼管の寿命評価」塩田 他(2021)

3.2.3 火SUS304J1 HTB クリープ破断材組織 (NIMS-CDS)

Ref. NIMS creep data sheet No. M-11

<Gauge portion>

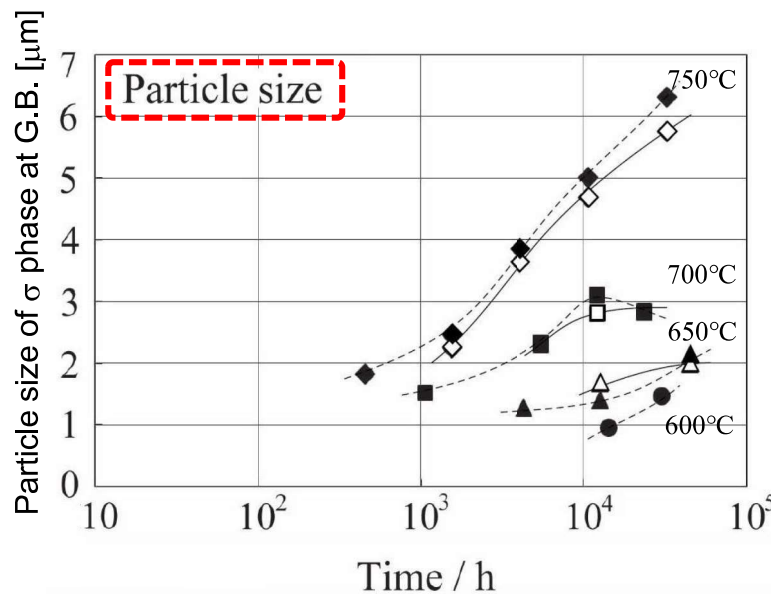
	100 h level	300 h level	1 000 h level	3 000 h level	10 000 h level	30 000 h level
800°C	 127.4 h (100 MPa)	 473.9 h (80 MPa)	 1 976.2 h (60 MPa)	 3 732.8 h (50 MPa)	 7 763.9 h (40 MPa)	 19 460.4 h (30 MPa)
750°C	 55.2 h (160 MPa)	 452.9 h (120 MPa)	 1 532.5 h (100 MPa)	 4 042.3 h (80 MPa)	 10 695.8 h (60 MPa)	 32 225.6 h (40 MPa)
700°C	 200.2 h (200 MPa)	 434.9 h (180 MPa)	 1 049.2 h (160 MPa)	 5 455.5 h (120 MPa)	 12 008.1 h (100 MPa)	 23 306.6 h (80 MPa)
650°C	 98.6 h (300 MPa)	 630.1 h (260 MPa)	 2 500.6 h (220 MPa)	 4 290.4 h (200 MPa)	 12 573.4 h (160 MPa)	 44 602.7 h (120 MPa)
600°C	 225.8 h (380 MPa)	 369.4 h (360 MPa)	 879.4 h (340 MPa)	 2 400.4 h (320 MPa)	 14 237.1 h (280 MPa)	 30 093.5 h (260 MPa)

σ相

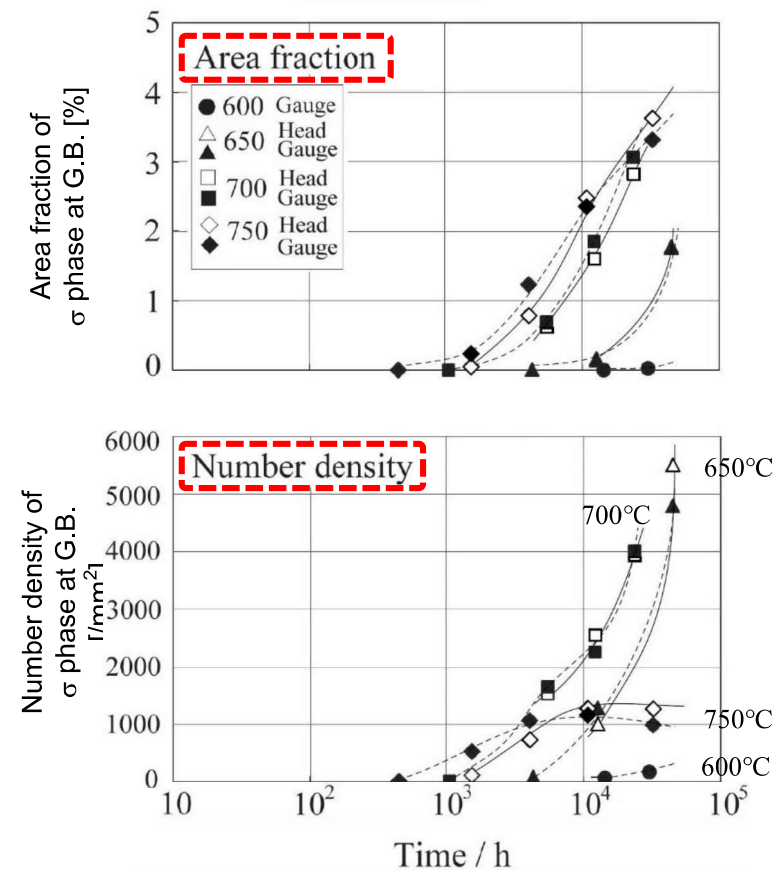
NIMSの試験結果においても
長時間ではσ相が析出！！

3.2.3 σ 相の定量評価 (NIMS-CDS)

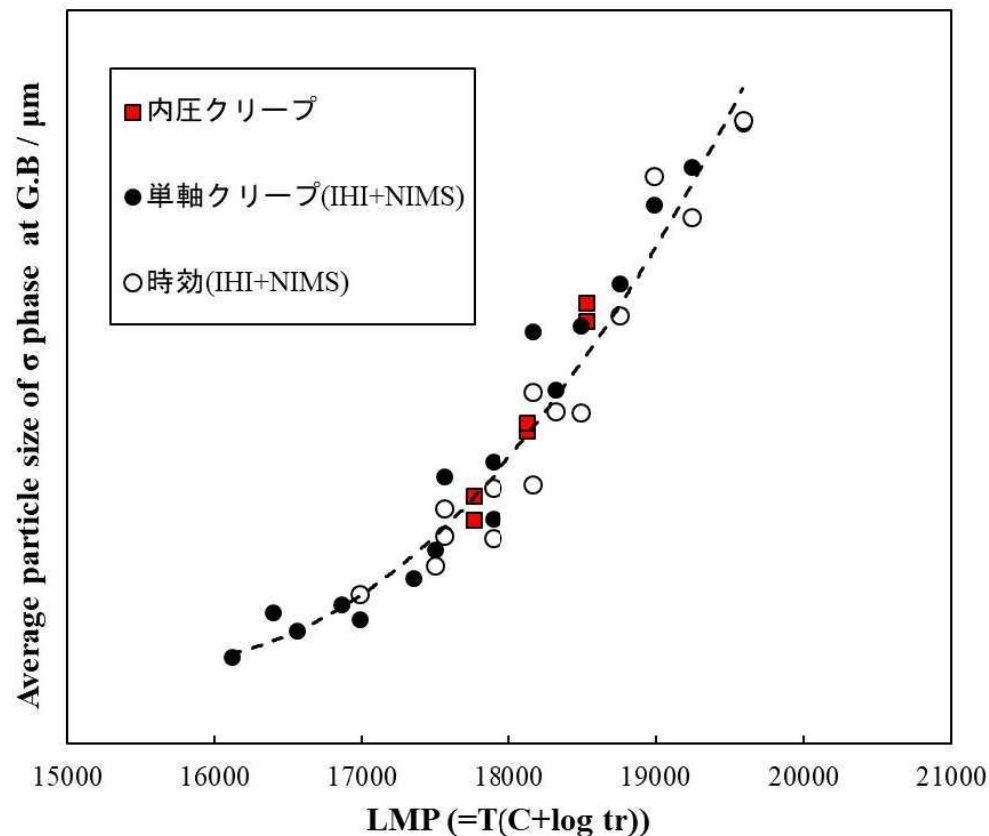
Ref. NIMS creep data sheet No. M-11



高温、かつ、長時間ほど σ 相粒子径は大きい。
→ σ 相の粒子径変化をLMPで整理！！

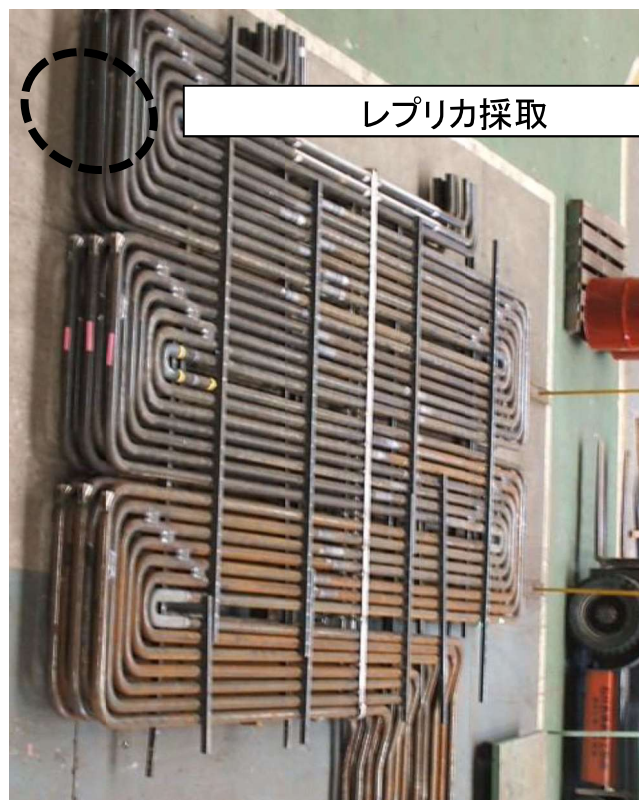


3.2.3 クリープ試験(σ 相粒子径とLMPの関係)

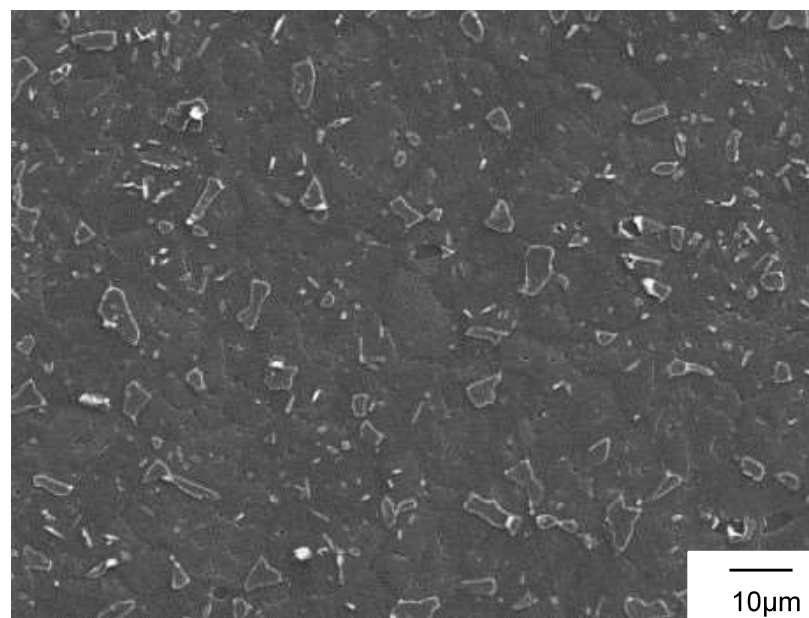


- ・ σ 相の粒子径変化は, LMPを用いて特定の関数にて整理できる.
- ・この関係は応力状態に依らず成立する.

3.2.4 ステンレス鋼の寿命評価手法

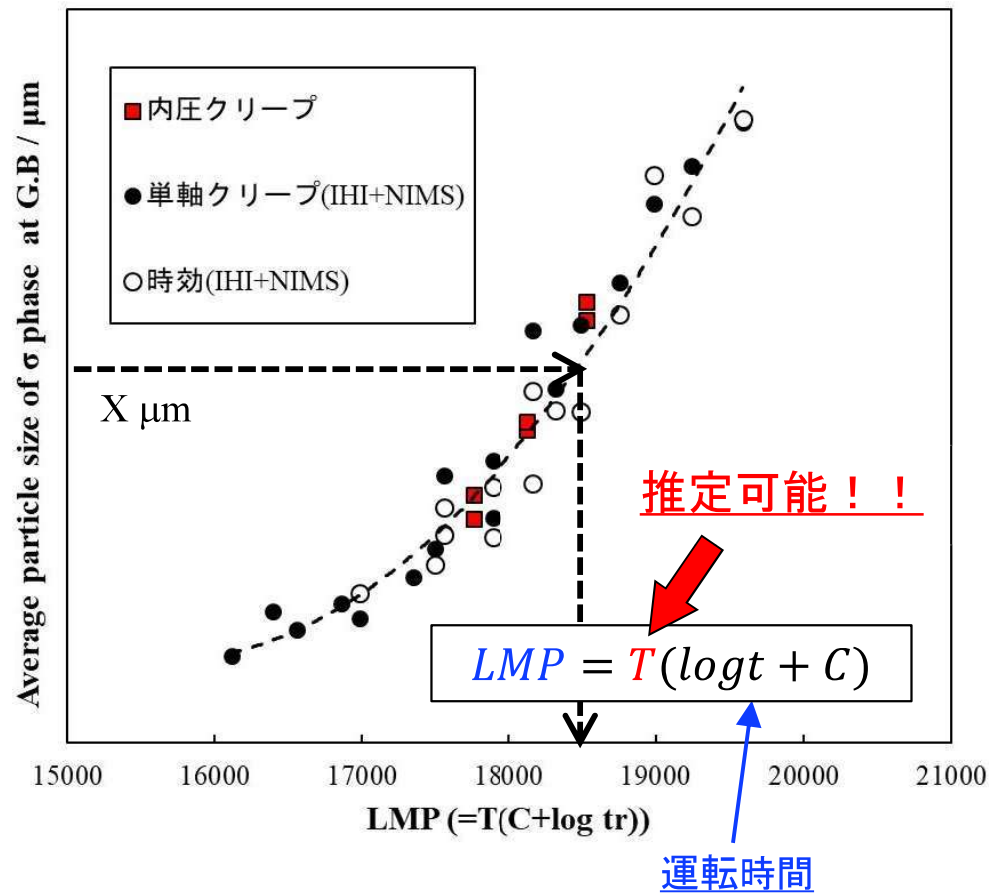


レプリカ採取



σ 相の平均粒子径
 $X \mu\text{m}$

3.2.4 ステンレス鋼の寿命評価手法



σ 相の粒子径測定から、
温度推定が可能!!

3.2.4 ステンレス鋼の寿命評価手法

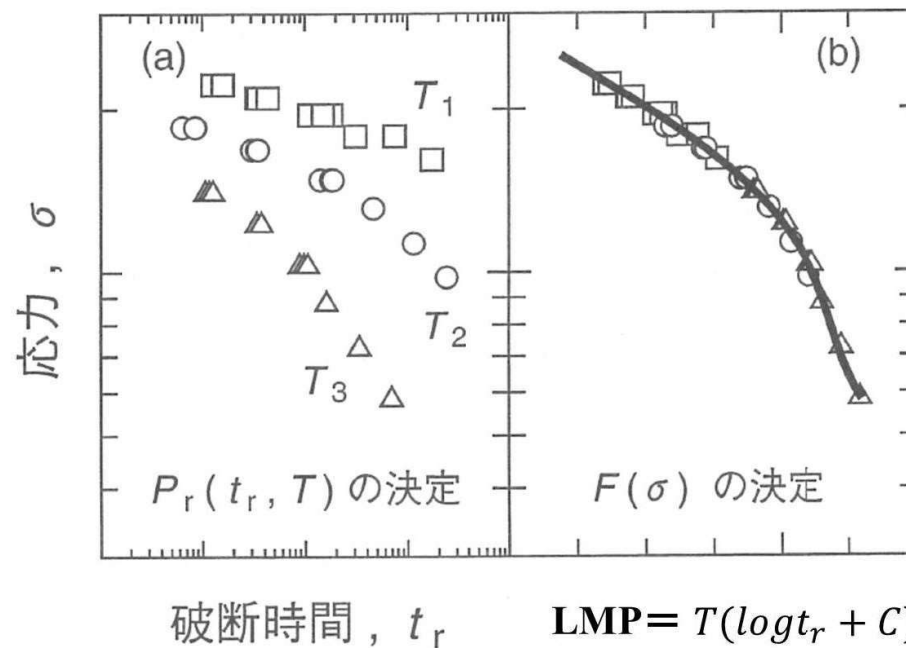
“Larson-Miller-Parameter” によるクリープ寿命評価

$$T(\log t_r + C) = LMP = f(\sigma) \quad \Rightarrow$$

$$\log(t_r) = \frac{LMP}{T} - C$$

T : 温度
tr : 時間
C : 材料定数

推定したメタル温度

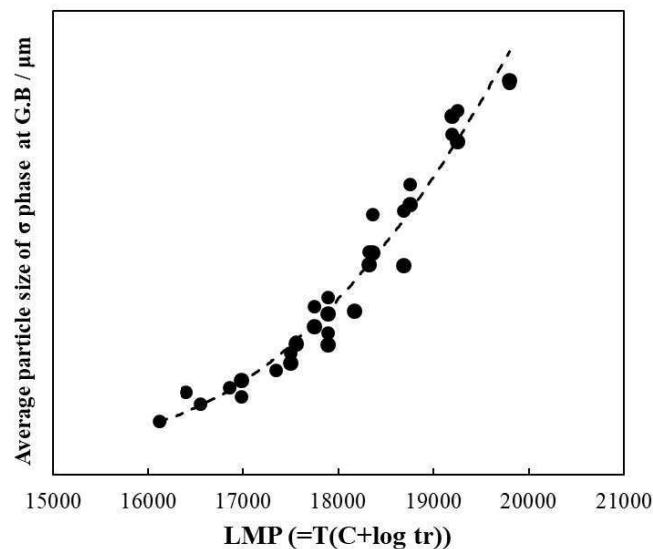


寿命評価が可能！！

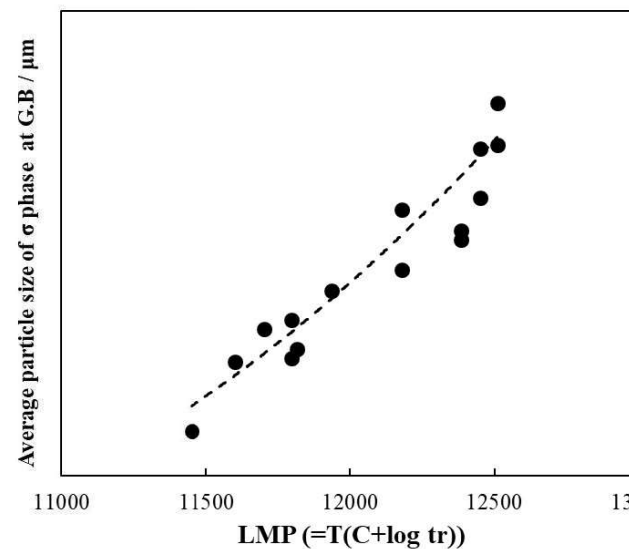
3.2.4 ステンレス鋼の寿命評価手法

オーステナイト系ステンレス鋼の温度推定カーブ

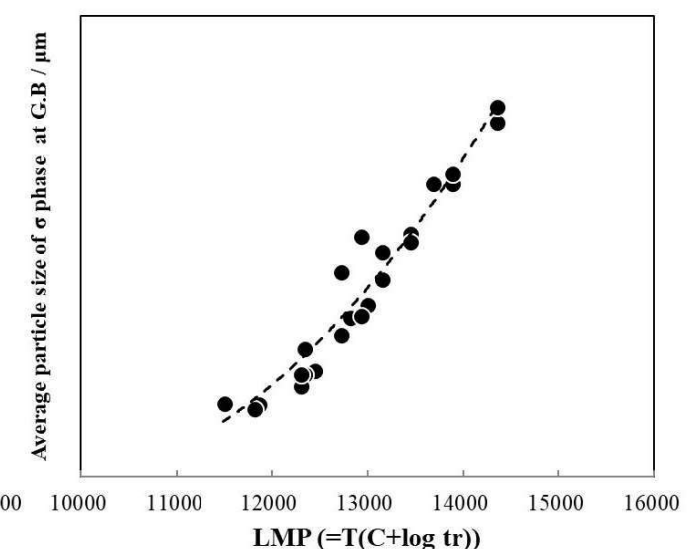
火SUS304J1HTB
(SUPER304H)



火SUS321J1HTB
(TempaloyA-1)



SUS347HTB



・ σ 相の粒子径測定による寿命評価は、種々のステンレス鋼に適用可能である！！

3.2.5 まとめ

オーステナイト系ステンレス鋼のクリープ寿命評価手法を確立するために、ミクロ組織変化からメタル温度を推定可能か検討した。その結果、以下の結論を得た。

- ・ σ 相粒子径変化はLMPにより整理可能であり、 σ 相の成長／粗大化挙動におよぼす応力の影響はほぼ認められなかった。そのため、 σ 相の粒子径を測定することでステンレス鋼のメタル温度を推定可能である。
- ・温度推定手法は様々なステンレス鋼に適用可能であり、本手法を適用することでステンレス鋼の高精度なクリープ寿命を評価することが可能である。

(抜管材での検証)

約16万時間使用した過熱器非加熱部管(SUSと9Cr鋼の接続管)の抜管材を使用し、

火SUS321J1HTB: σ 相粒径から推定した推定温度 (粒径 $2.7\mu\text{m}$ より、 603°C と推定)

火STBA28: 内面スケール厚さから推定した推定温度 (内層スケール $310\mu\text{m}$ より、 600°C と推定)

4. 耐圧部の延命対策

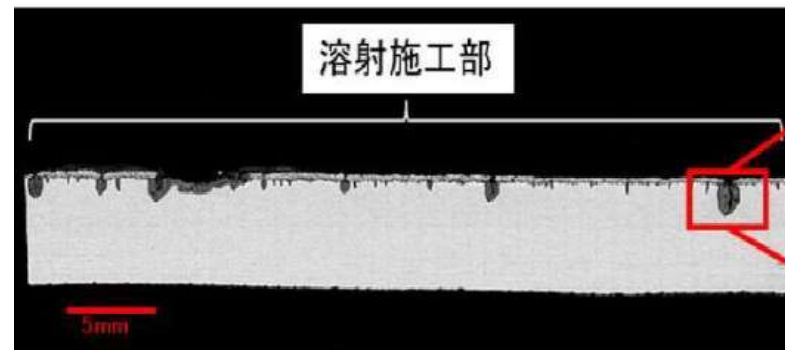
4.1 インコネル肉盛溶接のボイラパネルへの適用

4.1 背景

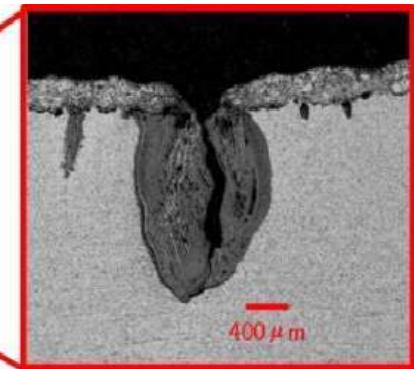
石炭焚きボイラの火炉壁管の腐食・摩耗に対して、従来は溶射により対応してきた。しかし、低NO_xバーナーを使用するなど、火炉内が厳しい硫化腐食環境においては数年の運転で溶射部の剥離や割れが発生してしまう。



硫化腐食



溶射部の割れ



「定検期間の短縮」や「定検インターバルの延長」のニーズ。
⇒「インコネル肉盛溶接」の適用によるボイラパネルの延命が注目されている。

4.2 インコネル肉盛溶接 概要

特徴

- 耐食性に優れている(インコネル溶材にCrが多く含まれる)
- 耐摩耗性に優れている(溶射より厚膜化が可能である)
- 肉盛部が減肉した場合に補修できる

⇒火炉の交換頻度を下げることが可能となる



インコネル肉盛
溶接施工部

4.3 インコネル肉盛溶接 取組み

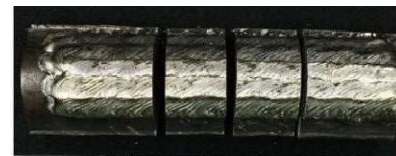
パネルへのインコネル肉盛溶接技術の確立(自動・手動)
課題

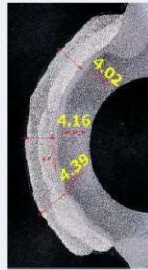
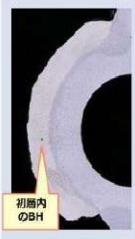
- ✓ 溶接施工条件の選定
溶材の溶け込みを深い→肉盛部のCr.量が低下する。
溶材の溶け込みが浅い→融合不良が発生する。
- ✓ 溶接トーチの仕様決定



ボイラメーカーの強み

- ✓ 溶接歪みを考慮した計画ができる。
- ✓ 肉盛厚さの自由度がある。

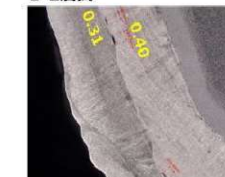


肉盛 厚さ	断面マクロ (中央)	PT結果		
		スタート側	中央	エンド側
		○: 無	○: 無	×: 2
4 mm				

管-1層間



1-2層間



単なる施工だけでなく、
お客様のニーズに合わせた信頼性のあるサービス提供が可能。
→国内電力会社から受注獲得。

5. おわりに

5. おわりに

火力発電業界は、以下に示すような状況から、非常に厳しい環境に変化してきている。

- ・再生可能エネルギーの拡大(風力発電, 太陽光発電など)
- ・CO2問題からくる石炭火力のフェードアウトおよび低効率発電設備の廃止
- ・水素, アンモニアやバイオ燃料への燃料転換
- ・ポストコロナ社会での省人化・リモート化

しかし, 安定した電源としての火力発電は必須であり, 今後30年以上はメンテナンス事業が継続していくものと想定する。そこでIHIとしては, 検査, 据付工事, 運転, 遠隔監視を含めたメンテナンス業務に, 新技術や新手法の開拓・検証を続けていき, お客様の要求に沿った提案内容を広げるため, メンテナンスの高度化を図っていく。

特に今回紹介した技術については, 定期検査等で直ちに適用させていくとともに, さらなる改良を進めていく。

**IoT/ICT技術の利用 × 新検査・点検手法
さらなるコスト低減, 工期短縮を実現していきます！**

IHI

Realize your dreams

ご清聴ありがとうございました。