


INIS-mf--1972 66/7

INIS DOCUMENT


בעיות ופתרונן בהתנהגות דלק גרעיני בראקטורים

א. בר אור

אקדמה

דלק גרעיני מהו

הדלק הגרעיני הנו מהמרכיבים הרגישים והמסובכים מכל שאר מרכיבי הראקטור הגרעיני. רגישים הם כיוון שבנוסף להיותם מקור שחרור האנרגיה וחמרי מבנה. משמשים הם מיכל אחסון לכמויות עצומות של חומרי בקוע רדיואקטיביים. מסובכים הם בהיותם עשויים חומרי מבנה מיוחדים במנם המצויים בתנאי פעולה של שדה קרינה, טמפרטורה ואטמוספירה קורוזיבית מהקשים הידועים בטכנולוגיה. התנהגות הדלק בריאקטורים השונים משפיעה ישירות על בטיחותם, וכן על כלכליות האנרגיה הגרעינית המופקת מהם. לכן נושא הדלק הגרעיני היה וממשיך להיות מהאתגרים המרכזיים של הטכנולוגיה הגרעינית.

בכל אחד פסוגי הדלק הגרעיני המקובלים היום נתן להבחין בשני מרכיבים: (תמונה מס' 1)

1. חמרים גרעיניים

2. חומרי עטוף.

חמרים גרעיניים

בריאקטור הטרוגני מצויים החומרים הגרעיניים באחד משני מצבי צבירה - מתכתי או קרמי. רשימת הנתכים והתרכבת המקובלים כחומרים גרעיניים, מרכיבי הדלק נחנת בטבלה מס' 1.

חמרי עטוף

הן נתכי האורניום ותרכובותיו, המשמשים כדלק גרעיני חייבים להיות עטופים בעת פעולתם בריאקטור, על מנת למנוע שחרור מוצרי הבקוע הרדיואקטיביים הנוצרים בהם למערכת הכור וממנה לאטמוספירה. חומרי העטוף עבור הריאקטורים השונים נבחרו ופותחו במשך השנים בקפדנות רבה, בהיותם המחסום העקרי בפני פריצת חומר רדיואקטיבי למערכת הכור. כיום התמסדו חומרי עטוף ספציפיים לפי סוגי הריאקטורים - ראה טבלה מס' 1.

התנאים בהם פועל דלק גרעיני

נסקור את התנאים המיוחדים בהם מצוי הדלק הגרעיני בעת פעולתו בריאקטור.

1. החומר הגרעיני בדלק עובר תהליך ביקוע.
2. חומרי העטוף מצויים בשדה קרינת נויטרונים.
3. הן החמרים הגרעיניים והן חמרי העטוף מצויים בטמפרטורות ומפלי טמפרטורות גבוהים.
4. מאמצים חזוניים ופנימיים פועלים הן על החומרים הגרעיניים והן על חמרי העטוף.
5. קיימת אינטראקציה בין החמרים הגרעיניים וחמרי העטוף וביניהם יב'ו מערכת הקירור.

בתנאים אלו פועל הדלק הגרעיני בריאקטור במשך חדשים רבים. תוך פעולתו, בהשפעת מקורות ההרס חלים בו שנויים נכרים, שנתן לחלקם לשלשה סוגים: שנויי מבנה, שנויי תכונות ושנויי מדות. שנויים אלו קובעים במדה רבה את אורך חיי הדלק. עקר הבעיות של הדלק הגרעיני נעוצות בשנויים אלו, והפתרונות - במניעתם.

דלק מחכתי

שנויי מבנה באורניום ונתכיו

בהשפעת תהליך הבקוע נהרס המבנה הגרגרי של האורניום. בהרס זה נתן להבחין כבר במנות קרינה מ- $\frac{MWD}{T}$ 1000. מדת ההרס חלווה במנת הקרינה ובטמפרטורת הדלק. בדלק מאורניום מחכתי נתן להבחין בשני אזורי הרס, ראה תמונה מס' 2 א, ב, מקור הרס המבנה בהוצרות מאמצים בהשפעת הבקוע הגרעיני, אשר בעקבותיו עובר האורניום עוות פלסטי, בעקר עייי יצירת תאומים ותנועתם. בטמפרטורה עד 250°C ההרס נכר, בטמפ' של 500°C לערך מדת ההרס נמוכה בהרבה, היות ובטמפ' זו משתחררים מאמצי הבקוע לפני שנוצרים עווהים בשריג.

שנוי תכונות מכניות

השפעת הקרינה נכרת בשני סוגי תכונות מכניות. אלו הנמדדות בעת ההקרנה בכור, ואלו הנמדדות מחוץ לו לאחר ההקרנה. תכונות הזחילה של האורניום הנמדדות תוך כדי פעולת הכור הובררה כבעלת חשיבות בהקשר לתפעול יעיל של דלק. תופעת הזחילה מואצת בהשפעת קרינה והוותה מקור רציני ביותר לדאגה כבר למפעילי הכור הנסיוני מטפוס Magnox ב-Calder Hall באנגליה שלא ידעו על קיומה עד הפעלת הכור.

בריאקטור זה, בעזרת תוספת תמיכות הוקטן המאמץ על מוטות הדלק, ובכך, בהתאם לתחשיבים בנטלה הסכנה מתופעת הזחילה בהשפעת קרינה. תהליכי הזחילה בכורים ממשיכים להעסיק את החוקרים.

תהליך הגידול - Growth

הגדול מתבטא בשנוי ממדי האורניום מבלי שחלים בו שנויי צפיפות. עוד בשלבי הנסוי הראשונים בהקרנת אורניום, הוברר כי מתכת זו משנה מידותיה בהשפעת הקרינה. תופעת שנוי המדות בהשפעת קרינה נקראה בשם גידול - Growth. ממדי השנוי נמצאו תלויים במדת הקרינה, ובחנאי הכנת מוטות הדלק העשויים אורניום. בדיקת מקדם הגידול, המוגדר ע"י $C = \frac{\text{שנוי ממדים}}{\text{חנת בעירה}}$ הראתה, כי הוא גדל עם ירידת הטמפרטורה. ויש לו מקסימום לערך ב- 500°C . מנסוי זה הסיקו שחנועת האטומים שהועתקו ממקומם בשריג בהשפעת קרינה, קובעת במדה נכרת את ממדי הגדול. כיום מקובל ההסבר של Buckley (1968) שהראה כי הגידול נובע משלוב בין שני התהליכים. בראשון, בהשפעת הקרינה מועתקים אטומי האורניום ממקומם, וכך נוצרים בו שני סוגי פגמים, הידועים בשמותיהם:

1. אינטרסהיצאלס (חדירים) - אטומים שאינם יושבים במקומות המיועדים להם בשריג.
2. העדרויות.

בשלב השני נעים הפגמים בשריג, בהתאם לטמפרטורת הדגם, מבטלים אחד את משנהו, או מתרכזים בנפרד במישורים שונים, היות ואורניום הינה מזכת בלתי איזוטרופית, שואפים

האינטרסטיציאלס להתרכז במשור מסויים בשריג וגורמים להתפשטותו בנצב למשור זה, והעדירות מתרכזות במשור אחרזגורמות להתכווצות. ההסבר לתופעת הגידול פגר מספר שנים אחר מציאת הפתרון האמפירי לבעיה זו. הפתרון התבסס על המחשבה שבאורניום מעודן גרגרים, יתכזזו תופעות הגידול, בתנאי ולגרגריו תקבע כווניות אקראית. אכן אחרי מציאת שטות לעדון הגרגרים וקביעת כווניות אקראית להם, נמצא כי בעית הגידול חדלה להיות גורם מגביל לחיי הדלק.

התנפחות

תופעת הגידול באורניום מתכתי הוותה מחסום לשמוש בו כדלק, שהוסר בשטה אמפירית בקלות יחסית.

מאידך, תופעת ההתנפחות משמשה עד היום כמחסום בפני אפשרות השמוש באורניום מתכתי כדלק לזמני קרינה ארוכים, ומנגנון ההתנפחות אף כי נחקר בפרוטרוט אינו מוכר על כל רזיו.

מקובל שתהליך ההתנפחות מתפתח בשלבים -

בשלב ראשון נוצרת בשריג מתכת האורניום בהשפעת תהליך הבקוע, כמות נכרת של העדרויות וחדירים. מתחת לטמפרטורה מסוימת אין השנים מתאחדים. כתוצאה מתנועתם בשריג יוצרים הם חללים (Voids) בממדים בין 0.5-1 מיקרון, הגדלים על פני משורים קריסטלוגרפיים אפיניים של השריג המוקרן. המשך ההקרנה גורר תנועת החללים וגדולם לבועות (Bubbles) במדות בין 200-50 מיקרון. המעבר מאוסף חללים לבועות מלווה בתופעת ההתנפחות. מחקרים רבים בוצעו להבנת מנגנון המעבר משלב החללים לשלב הבועות. הדעות נחלקות אודות מעבר זה. יש הרואים בו מעבר רציף מחללים לבועות ע"י תוספת מוצרי בקוע גזיים, יש הרואים בו תהליך נפרד שכרוך בהסדקות האורניום בהשפעת קרינה. ויש הרואים בו תהליך של גדול חללים הנעים בהשפעת מפלים טרמיים ויוצרים בועות. ראה Mcdonell.

תלות ההתנפחות בטמפרטורה

תהליך ההתנפחות מושפע באופן מהותי הן ע"י הטמפ' בה מצוי האורניום והן ע"י מנת הקרינה. כבר בטמפ' של 350°C ומנות קרינה מעל $\frac{MWD}{T} 1000$, נתון להבחין בתהליך ההתנפחות, עליה נכרת בהתנפחות מופיעה בין $350-500^{\circ}\text{C}$, בין $500-600^{\circ}\text{C}$ מדת ההתנפחות קטנה, ומעל 600°C היא נעלמת.

דרכים למניעת ההתנפחות

שתי דרכים נמצאו כיעילות להקטנת חופעת ההתנפחות -

1. תוספת אלמנטים כאלומיניום וסיליקון הגורמות למשקעים במטריצת האורניום,

והלוכדות את החללים, לפני החלכדותם לבועות.

2. לחץ חיצוני בסדר גודל של 60 אטמוספירות.

ראה תמונה מס' 3.

השטה הראשונה שמה עבוד נחכי האורניום המשמשים דלק גרעיני בכורי הכוח מטיפוס

Magnox. השטה השנייה אינה בשמוש אך נראית כמבטיחה בכורי מים (Leggett 1970).

הבנת תהליך ההתנפחות וחפוש דרכים אמפיריות להתגבר עליה נמשכו שנים רבות. בנוסף

לשתי הדרכים שנמצאו יעילות להתגברות חלקית על בעיית ההתנפחות חפשו החוקרים חומרי

מבנה אחרים אשר בעיית ההתנפחות בהם תהא פחות חמורה.

אכן, מבין מספר נכר של חומרים שנוטו התברר, כי לתחמצת האורניום תכונות עמידות

בפני התנפחות. מההכרה בעמידות תחמצת האורניום בפני התנפחות ועד לשלב בו תפסה

תרכבת זו את המקום המרכזי כחומר דלק גרעיני, נבחנו תכונותיה, דרכי הכנתה

והשפעות השונות בדרכי הכנתה על כושר עמידתה בתנאי קרינה.

המשקל הרב שמחסימים לתהליך ההתנפחות, על אורך חיי הדלק הגרעיני, הקשר ההדוק בין

תהליך זה ומציאות בועות במוצקים. תנועת הבועות במוצקים, השפעותיהם על מבנה

ותכונות החומר הביאו לידי פתוח ענף מדעי חדש הודן בהתנהגות. ותנועות בועות בחומר.

דלק קרמי

שנוי מבנה בתחמצת אורניום

שנויי מבנה בתחמצת אורניום בהשפעת קרינה קשורים בשתי תופעות

1. הופעת בועות בשריג החמצת האורניום ותנועתן בו.
 2. סדיקה ואחוי תחמצת האורניום בהשפעת מאמצים טרמיים וטמפרטורה גבוהה.
- מקור הבועות וההליך גדולן בתחמצת אורניום, דומה לאלו באורניום מתכתי. אולם היות ותחמצת האורניום מוקרנת למנות קרינה גבוהות בהרבה מאשר אורניום מתכתי, תהליכי התנפחותה מטובכים יותר. בנוסף ליצירת החללים וגדולם לבועות מבחינים בתנועות בועות, האחראית למבנה הקולומנרי האפיוני. ראה תמונה מס' 4. גבולות הגרגרים הקולומנרים המכילים בנוסף לבועות, פגמים וזהומים המשמשים יחדיו תעלות לשחרור מוצרי הבקוע הגזים ממרכז הדלק אל פני המעטפת.

שנויי צפיפות בתחמוצת האורניום

בעוד שבאורניום מתכתי מוכרת תופעת התנפחות בהשפעת ההקרנה, בתחמצת האורניום מוכר בנוסף להתנפחות גם תהליך הפוך המתבטא בדנסיפקציה או התכווצות. תהליך הדנסיפקציה נובע מכך שתחמוצת האורניום המיוצרת בשטות סטלורגית האבקות מכילה חללים פנימיים, הנסגרים בהשפעת לחץ, טמפרטורה והקרנה. תהליך הדנסיפקציה מופיע בשלבי ההקרנה הראשוניים, הרבה לפני התחלת תהליכי ההתנפחות. בעית ההתנפחות בתחמוצת אורניום קטנה בהרבה במנות קרינה זהות מאשר באורניום מתכתי בעקר בשל שלושסבות -

1. תחמצת האורניום מכילה חללים, בהיותה מוכנת בתהליכי סטלורגית האבקות.
2. תחמצת האורניום ממיסה במוצרי בקוע.
3. תחמצת האורניום הנה בעלת מבנה קריסטלוגרפי איזוטרופי ומקטין תהליך הגדול.

מנגנון ההתנפחות ב- UO_2 יש בה מן היסודות של ההתנפחות באורניום, אך יש בו חופעות אפיניות. Nichols ו- Warner (1970) רכזו את מירב האספקטים בנושא ההתנפחות ופחו מודל מתמטי לחאור ההתנפחות ושחרור הגזים.

סדיקה בתחמוצת האורניום

לפי Gittus (1967) כתוצאה מפריכות תחמוצת האורניום נוצרים בה כבר עם ההפעלה הראשונה של הריאקטור סדקים רדיאליים. סדקים אלו מתאחים בהמשך ההקרנה כתוצאה מתנאי לחיצה של המעטפת והטמפרטורה הגבוהה שבגילי תחמוצת האורניום. המבנה האופיני מחקבל, ראה תמונה מס' 4.

שחרור מוצרי בקוע גזיים

תהליך שחרור הגזים מוצרי הבקוע מתחמוצת האורניום מותנה בתהליכי הסדיקה וההתנפחות. השוואה בין תוצאות נסיוניות לתוצאות מחושבות נתונות בתמונה מס' 5, המראה התאמה טובה בין השניים. הגזים הנוצרים בחוך צנרת העטוף מסוגלים לגרום בנוסף לעוזה, לתופעת קורוזית מאמצים. למניעת השפעת הגזים על קורוזית מאמצים הוכנס Getter שתפקידו לבלעם.

U_3Si

אף כי עד היום אין U_3Si משמש כדלק אלא בקנה מדה נסי וני, יש הצופים ש- U_3Si ישמש כדלק בקנה מדה נכר בריאקטורי מים כבדים בעתיד, כתוצאה משלוב התכונות הבאות:

1. עמידות מצוינת בקורוזיה
2. חתך בליעה קטן משל UO_2
3. מוליכות טרמית טובה משל UO_2
4. העדר מעבר פזות עד לטמפי של $800^\circ C$
5. צפיפות גבוהה משל UO_2 .

בעיה מרכזית שמונעת השמוש היעיל בהרכובת זו, מידת ההתנפחות הגבוהה יחסית. נושא זה העסיק את מעבדתנו, ובסדרת עבודות של Kimmel (1973), ו-Bar-Or ו-Kimmel (1973) ניסינו דרכים לחקור הבעיה, תמונה מס' 6.

חומרי המעטפת

הגדול, ההתנפחות והזחילה בנתכי אורניום או ההתכווצות, התנפחות וסדיקה בתחמוצת האורניום לכשעצמם אינם בגדר תקלה, כל עוד מעטפת הדלק אינה נפגמת. מכאן החשיבות הרבה שמיחסים למעטפת, טיבה, כשרה לשמש מיכל לחומר הגרעיני העובר שנויי מדות, וזאת בתנאי טמפרטורה, קרינה, מאמצים וסביבה קורוזיבית השוררים בריאקטור, בעת פעולתו, עצירתו הרגילה, או המזורזת והפעלתו מחדש. בחירת חמרי המעטפת ותהליכי העטוף היא מהבעיות המטלורגיות בעלת חשיבות שאינה נופלת בערכה מבעיות החומרים הגרעיניים. הקשיים בפתרון בעיות המעטפת נובעים משלב דרישות שעליה למלא, שעקרון -

1. חתך בליעה נמוך

2. תכונות מכניות מתאימות

3. יחסי שכבות טובה עם החומר הגרעיני ונוזל הקרוור.

כיום התמסדו שלוש קבוצות מתכות כמעטפות לדלק בכורי הכח השוניים, כפי שראינו בטבלה מס' 1.

נתכי צירקוניום - בכורי מיס

נוזכי מגנזיום ופלדה - בכורים מקוררי CO₂

השפעות הטמפרטורה על התנהגות מעטפות הדלק

לטמפי השפעות על תכונות החוזק על הזחילה ועל שנויי מבנה. כמו כן, במעטפות בדלק גרעיני הובחנה תופעת הזחילה הדיפוזיונית שההכרה אודות השפעותיה הטכנולוגיות כמעט ולא היתה מוכרת עד כה.

מעטפות נתכי צירקוניום

היות ובריאקטורים מקוררי מים מהסוגים BWR, PWR ו-Candu משמשת צנרת נתכי צירקוניום כמעטפות דלק גרעיני, נעסוק בהרצאה זו רק בסוג זה של מעטפות. מספרו של Douglass (1971) נתן ללמוד אודות מכלול עבודות הענק שנעשו בנתכי צירקוניום עבור מעטפות דלק גרעיני.

תכונות ההתארכות של נתך צירקלוי

למניעת פריצת המעטפת, חייב נתך הצירקלוי להיות בעל כשר התארכות בכל תנאי הפעולה בכור. (כאשר הידרידים, קרינה מאמץ מהיר וכווניות משפיעים על התארכות). היות וכל העוותים של תחמצת האורניום מגיעים לכדי 1%, מקובל לדרוש מצנרת הצירקלוי שלאחר הקרנה תהיה בעלת תכונות התארכות מעל 1%. תכונות ההתארכות בהיותן התכונות המשמעותיות ביותר בהקשר למניעת פריצת המעטפת נמדדו בשלש שטוח -

1. מדידה קלסית של התארכות בדגמים סטנדרטיים

2. מדידה קלסית של שנוי חתך בדגמים סטנדרטיים

3. מדידת ההתארכות בשטח נפוח צנורות.

מתוך ההכרה בחשיבות ההתארכות, וכתוצאה מפריצות בגלל העדר התארכות מספקת פותחו תהליכים לטפול טרמי להשגת יתר התארכות. ראה Kaden ו-Holzer תמונה מס' 7.

זחילה בהשפעת קרינה בנתכי צירקוניום

בעיה הזחילה והשפעת הקרינה עליה נבחנו עיני מספר רב של חוקרים מתוך החשש לעוות המעטפה של יחידת הדלק.

Nichols (1969) סכם תוצאות הזחילה של חוקרים שונים, והראה כי קימות שלש תופעות המאפיינות נתכי צירקוניום:

1. הזחילה במאמץ נמוך מותנית במדת העוות בקור.

2. הזחילה מזורזת בלחצים גבוהים מעל 10,000 PSI.

3. זחילת צירקוניום בהשפעת קרינה מותנת בדרגת קשיותו הראשונית.

Nichols פנה מודל כולל להסבר שלוש התופעות.

נתן לצפות שהזחילה של מעטפות הדלק התבטא בשלושה כוונים -

1. התכוצות הצנרת, בהשפעת לחצים חצוניים.
2. התנפחות הצנרת בהשפעת התנפחות החומר הגרעיני והוצרות לחץ ממוצרי הבקוע הגזים.
3. שנויי עובי מקומיים בשפעת הוצרות מרוחים בין גלי-לחץ תחמוצת האורניום.

למניעה בעיות זחילה ממליץ Nichols למנוע מאמצים מעל 10,000 P.S.I., זאת בעזרת הקטנת קוטר מעטפת הדלק, הגדלת עובי הדופן, והקטנת הפרש הלחצים ע"י תוספת גז אינרטי בחלל המעטפת.

השפעת הידרידים בנתכי צירקוניום

התכונות המכניות, כהתארכות והנטיה לסדיקה, אחרי יות במדה רבה לכשרן של המעטיפות למלא תפקידן. בנתכי צירקוניום מושפעות תכונות אלו במדה רבה מנוכחות הידרידים וצורת חלוקתם במעטפת. חדירת המימן לנתכי צירקוניום ויצירת ההידרידים נובעת מתהליך החמצון במים בחנאי הפעולה בכור. ההשפעה המכריעה של כווניות ההידרידים על תכונות הצנרת דחפה לפעילות מדעית נרחבת בנושא זה. ELLS (1968) סכם עבודה זו ומונה את הגורמים הבאים כאחראים לכווניות ההידרידים.

1. תהליכי יצור הצנור.
2. חלוקת המאמצים בצנרת
3. כווניות גבישית מועדפת

בתמונה מטי' 8 רואים הידרידים בכוון הקפי ונצב לדפן הצנור.

גם לאחר סכמו של Ellis נמשכה הפעילות המדעית בנושא ההידרידים. נתן לאמר שגם כיום אין הבנה של כל פרטי יצירת ההידרידים וכוונם.

מבחינת יצור דלק, הוברר כי בדיקת התחלקות ההידרידים בצנרת הנה שטה יעילה לבקרת טיב הצנרת.

סדיקה מקורוזית מאמצים (S.C.C.) (Stress Corrosion Cracking)

חוקרים מספר הראו כי ליווד השפעות על תכונות ה-S.C.C של נתכי צירקוניום. היות ויוד הנו מוצר בקוע המשתחרר מ- UO_2 חשוב ביותר לקבל את מלוא האינפורמציה בנושא זה. עד היום נראה כי הזעות חלוקות. גישה כמותית לטיפול בנושא S.C.C הציג James (1970) אשר בדק את מהירות קדום הסדק והראה כי קצב קדומו משתנה במדה נכרת בהשפעת תנאי הסביבה.

תקלות בדלק בריאקטורים תעשייתיים

למרות מחקר הפתוח והתכנון הרב שהושקעו בסוגי הדלק שהוכנסו לריאקטורים התעשייתיים, התברר הי עם הפעלה ריאקטורים בקנה מדה נרחב הופיעו תקלות שלא ציפו להן. הופעת תקלות אלו בשלבי ההפעלה של הריאקטורים גרמה נזק נכר וחייבה מחקר נכר נוסף להבנת מקורן ולחפוש אחר דרכים לתקונן. להלן נדון במקלות העקריות.

אינטראקציה בין מעטפות וגלילונים

בריאקטור Dresden 1 בארה"ב ו-KRB בגרמניה הופיעו במעטפת הדלק סדיקות אפיניות שחייבו הפסקת פעולת הריאקטורים. בדיקת הסבות לתקלה גלתה כי בתנאי חמום מסוימים כתוצאה מהתפשטות גלילוני ה- UO_2 נצמדים אלו למעטפת ומונעים אפשרות התפשטות התרמית. כתוצאה מהמאמצים הנוצרים באלוץ זה וכאשר תכונות ההתארכות של הצנרת נמוכות מהנדרש, נוצרים במעטפת סדקים אורכיים. נושא האינטראקציה UO_2 -מעטפת נחקר רבות, ראה דו"ח Halden (1972), בעזרת מדידות התפשטות המעטפת בעת פעולתה בריאקטור. בעקבות מחקרים רבים בנושא זה נמצאו הפתרונות הבאים:

2. הגדלת תכונות ההתארכות של נתכי הציקאלוי עיי הרפיה מעל 500°C
3. שמוש בשכבת גרפית למניעת הצמדות ה- UO_2 למעטפת
4. הקטנת אורך הגלילונים על מנת לשמור על יחס מקסימלי של 1 בין קוטר הגלילון לארכו

הידרידיזציה פנימית Klepfer (1972)

- תופעה זו התגלתה לראשונה בריאקטור Big Rock Point בארה"ב וב- KRB בגרמניה. שניהם מסוג BWR. התופעה התגלתה בצורת פריצה של המעטפת במספר יחידות דלק המלווה שחרור מוצרי הבקוע אל מערכת הקרור. בדיקת התקלה הראתה כי באזור סדיקת המעטפת נתגלה רכוז הידריזיס גבוה. הסתבר שתהליך ההידרידיזציה יכול להתרכז באזור מאד מצומצם במעטפת ולגרום לפגימתה. הסתבר ששאריות הרטיבות בגלילוני ה- UO_2 הוא מקור המימן האחראי להידרידיזציה מקומית. כמו כן הוברר שקימת רגישות מיוחדת של נתכי צירקאלוי לנקוי ב- HF. כפתרון לבעיה ההידרידיזציה הפנימית הותוו שלוש דרכים.
1. שחרור הגלילונים מאדי מים בעזרת ואקום
 2. בטול השמוש ב- HF לעכול צנרת הצירקאלוי
 3. הכנסת Getter לבליעת מימן המשתחרר בעת ההקרנה.

דנסיפיקציה של UO_2

- תופעת הדנסיפיקציה נתגלתה בריאקטורים Gina בארה"ב וב- Beznau בשוויצריה. שניהם מסוג PWR. תופעה זו הופיעה במנות קרינה נמוכות לגביהו לא צפו לכל תקלה. הריאקטורים הופסקו במטרה לבדוק התקלה. הסתבר כי בהשפעת קרינה מתכווצים גלילוני ה- UO_2 בתהליך סנטור בחס. כתוצאה מכך מתסצרים הגלילונים ונוצרים ביניהם רוחים. היות והמעטפת שנבחרה עבור ריאקטורים אלו היתה בעלת דופן דקה, החל בה

תהליך זחילת המעטפת אל המרווחים בין הגלילים, אשר הביא לפגימת הדלק.

הדרכים לפתרון בעית הדנספיקציה הן:

1. שמוש בצנרת צירקאלוי בעלת עובי דפן הדרוש לעמוד במאמצי זחילה.
2. העלאת צפיפות הגלילונים.
3. לזבריקציה ושמוש בקפיצים פנימיים.

ס כ ו ם

כיום פועלים עשרות רבות של ריאקטורים המפיקים כדי מספר אחוזים מהחשמל המיוצר על פני כדור הארץ.

בעקבות משבר האנרגיה גדל קצב בניית תחנות הכח הגרעיניות ויש ארצות המתכננות להפיק כדי 50% מהחשמל מריאקטורים גרעיניים.

בד בבד עם קדום התעשייה הגרעינית הולך ומשתכלל הדלק המשמש לבת הריאקטורים.

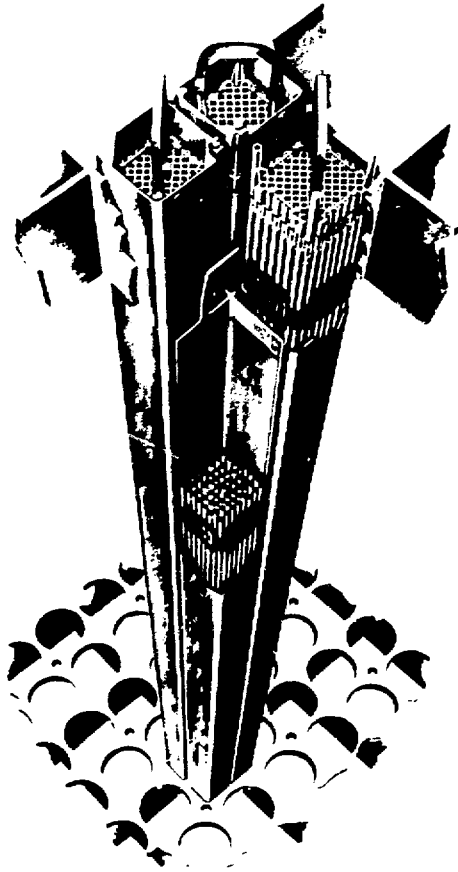
העבודה בנושא הדלק נמשכת במרץ בכל המרכזים העקריים כאשר עקר המשימות, להגביר בטיחותתפעולו, להעלות ההספק מיחידה דלק, להעלות אורך חייה ולהוזיל הוצאות יצורה. בתמונה 9 נתנת עיי Williamson (1971) השוואה של הנסיון שנרכש עד כה בסוגי הדלק המצויים בשמוש תעשיתי עם המגבלות המחושבות לגבי סוגי דלק אלו. כמו כן נתן לראות בתמונה זו תכונות של מספר סוגי דלק גרעיני נסיוניים.

ביבליוגרפיה

- Buckley S.N. A.E.R.E 5944 (1968)
- Douglass D.L. The Metallurgy of Zr (Book) 1971, I.A.E.A Vienna.
- Ells C.E. Jour. Nuc. Mat. 28 (1968) 129.
- James L.A. Nuc. App. and Tech. 9 (1970) 260.
- Gittus J.H. UKAEA TRG Rep No. 1547(s) 1967
- Holzer R. Kaden W. Berkeley Conf. 1973.
- Kimmel G. (Ph.D. Thesis) Israel Inst. of Tech. 1973.
- Kimmel G, Bar-Or A. Tommer A. Jour Nuc. Mat. 40 242 (1971)
- Klepfer H.H. Richards R.B. Trocki T. Amer. Power Conf. 34th Annual Meeting 1972.
- Leggett R.D. et al Nuc. App. Tech. 9 (1970) 673.
- McDonnell W.R. Berkeley Conf. (1973):
- Nichols F.A. J. Nucl. Mat. 30 (1969) 249
- Ritzman R.L. Markworth A.J. Oldfield W. Chubb W. Nuc. App and Tech. 9
1970 167.
- Warner H.R. Nichols F.A. Nuc. App and Tech. 9, 1970 148.
- Williamson H.E. Ditmore D.C. Reactor Technology 14 (1971) 2.
- Halden 13th Annual Report 1972

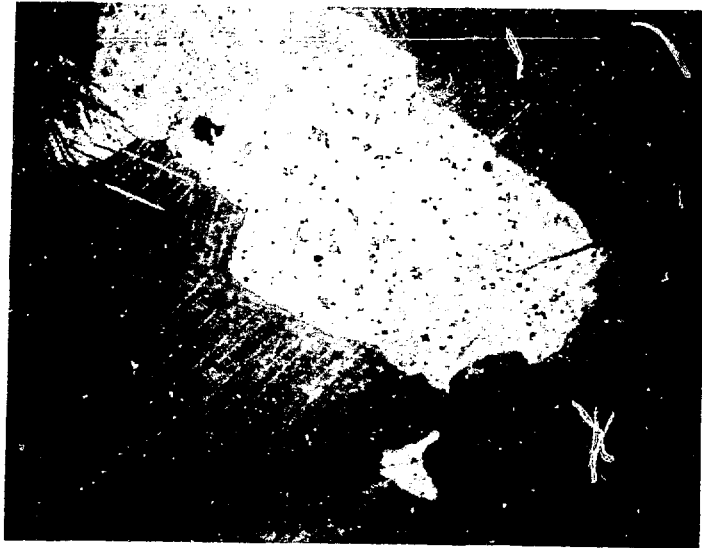
רשימת התמונות

- | | |
|-------------|--|
| תמונה מס' 1 | דלק גרעיני. |
| טבלה מס' 1 | חומרים גרעיניים ומעטפות בסוגי דלק שונים. |
| תמונה מס' 2 | השפעת קרינה על עוות גרגרי אורניום 0.1% כרום.
א. מבנה גרגרי אורניום 0.1% כרום לפני קרינה.
ב. מבנה גרגרי אורניום 0.1% כרום אחרי $\frac{MWD}{T} \cdot 1000$. |
| תמונה מס' 3 | תופעת ההתנפחות בנתכי אורניום שונים. |
| תמונה מס' 4 | מבנה תחמצת אורניום לאחר קרינה. |
| תמונה מס' 5 | שחרור גזי מוצרי בקוע, השואה בין תאוריה לנסוי. |
| תמונה מס' 6 | מטלוגרפיה של U_3Si .
א, לפני דלטיזציה.
ב. אחרי דלטיזציה. |
| תמונה מס' 7 | השפעת טמפרטורה ההרפיה על תכונות המשיכות של נתך צירקאלוי. |
| תמונה מס' 8 | סקיעה כוונית של הידרידים בצנרת צירקאלוי
א. הידרידים גדולים
ג. הידרידים הקפיים
ב. הידרידים קטנים
ד. הידרידים רדיאליים |
| תמונה מס' 9 | השוואת יחידות דלק העשיתיות עם נסיוניות. |



תמורה מסי' 1

מטעפה	חומר גרעיני	חומר קרוך	סוג הריאקטור
Zircalloy 2	UO_2	מים קלים	B.W.R
Zircalloy 4, 2	UO_2	מים קלים	P.W.R
Zircalloy 2	UO_2	מים כבדים	Candu
	U_3Si	או קלים	
נחקר מבנזיום	U-Fe, Al, Si U-Mo	CO_2	Magnox
פלב"ם	UO_2	CO_2	A.G.R
גרפיח Sic	UO_2	He	H.T.R
פלב"ם	UC UO_2 UC	Na	כור מהיר



א

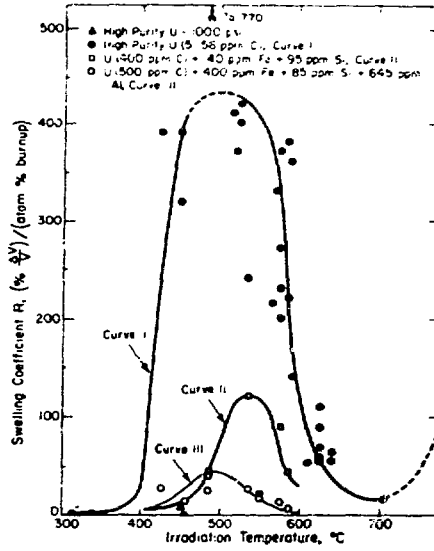
× 100



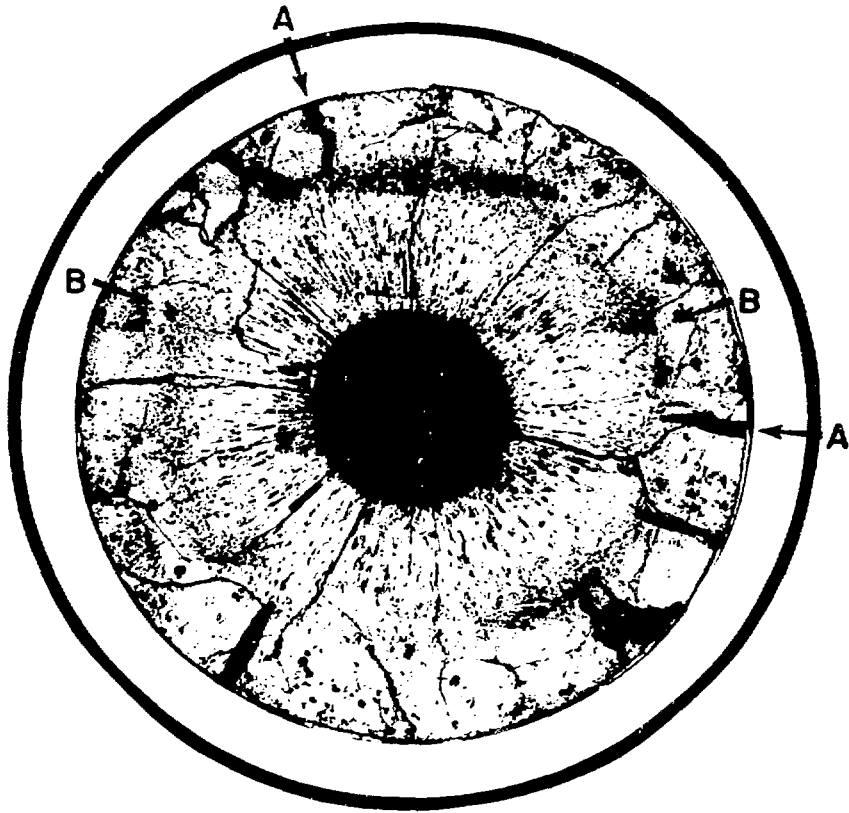
ב

× 100

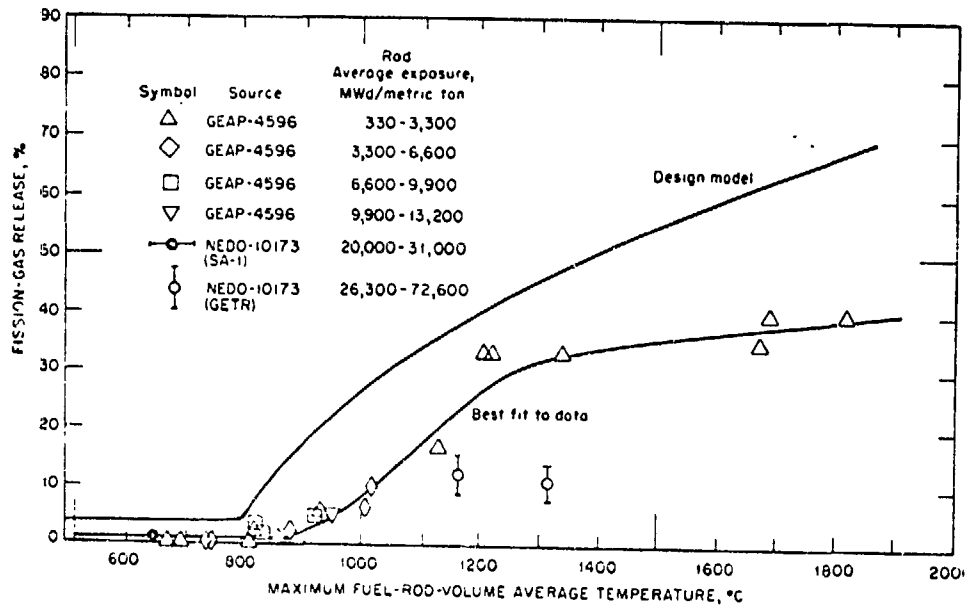
תמונה מס' 2



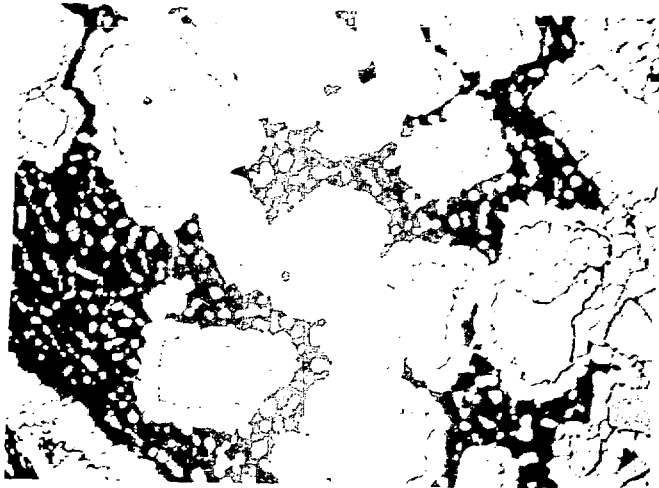
Temperature Dependence of Swelling in High-Purity Uranium and Dilute Uranium Alloys (Leggett et al., 1965)



Radial cross section of mixed-oxide fuel element. 'A' designates cracks that formed on startup and have healed in the hotter regions. (Run at 15 Kw/ft. to 3 at 2% burnup, maximum clad temperature 600°C).

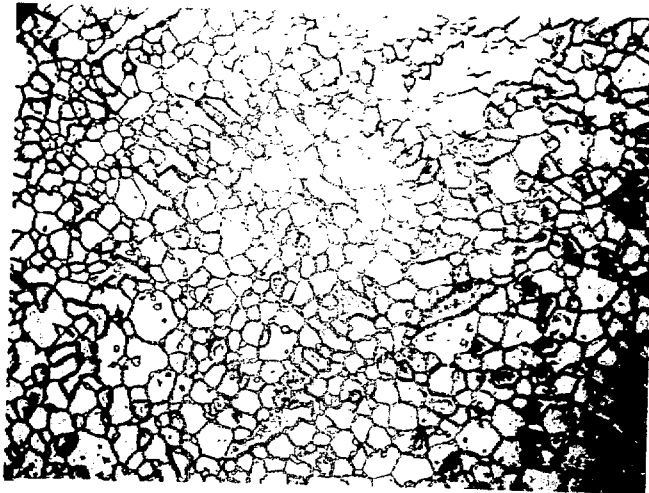


תמונה מס' 5



× 100

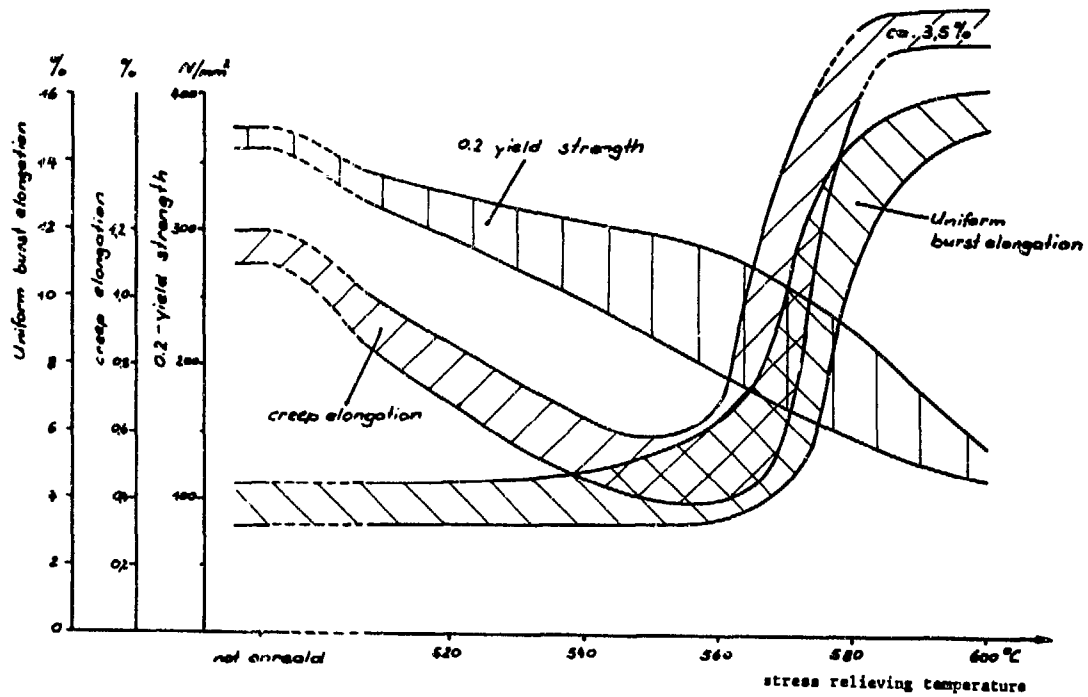
ה



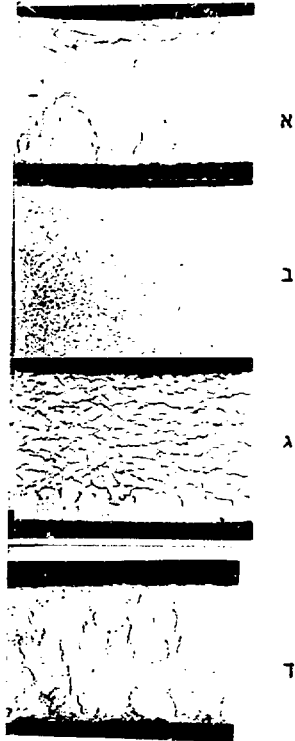
× 100

ו

תמונה מס' 6



Mechanical properties at 400 °C as a function of stress relieving temperature. The inner pressure creep test lasted 240 h with hoop stress of 150 N/mm²



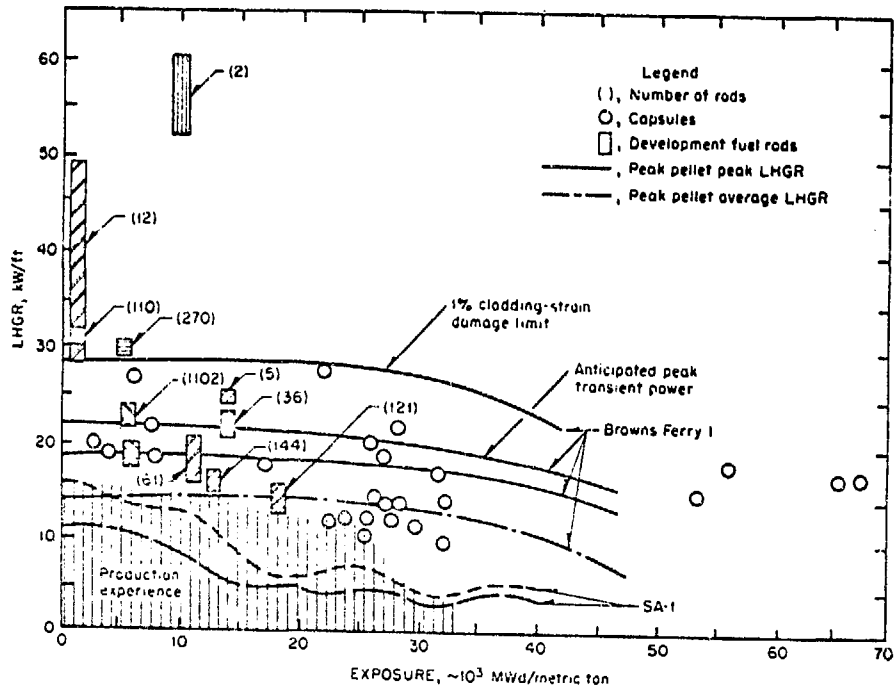
א

ב

ג

ד

תמונה מס' 8



Comparison of proposed operation to production and development experience. The different types of crosshatching and filled-in (black) symbols represent data from various development programs.